

ISSN 0355-1180

HELSINGIN YLIOPISTO

Elintarvike- ja ravitsemustieteiden osasto

EKT-sarja 1901

Maitojauheiden vaikutus ekstruusiotuotteen rakenteeseen ja aistinvaraiseen laatuun

Janne Rauta

Helsinki 2019

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution – Department Elintarvike- ja ravitsemustieteiden osasto	
Tekijä/Författare – Author Janne Rauta			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Maitojauheiden vaikutus ekstruusiotuotteen rakenteeseen ja aistinvaraiseen laatuun			
Oppiaine / Läroämne – Subject Elintarviketeknologia			
Työn laji/Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika/Datum – Month and year Toukokuu 2019	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 83
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Ekstruusio on monikäyttöinen lämpömekaaninen elintarvikkeiden prosessointimenetelmä, ja ekstruusiolla valmistetut viljapohjaiset snack-tuotteet ovat yksi merkittävimmistä valmistuoteryhmistä. Kirjallisuuskatsauksessa käsiteltiin ekstruusioprosessia yleisesti, jonka lisäksi perehdyttiin tarkemmin viljan eri komponenttien ja maitojauheiden vaikutuksiin ekstruusiassa sekä käytiin läpi erilaisia menetelmiä, joilla voidaan arvioida ekstruusiotuotteiden ominaisuuksia ja laatua. Kokeellisen osan tavoitteena oli selvittää, kuinka maitojauheen sokerikoostumus ja -pitoisuus ja lisäksi massan eri maitoproteiini- ja vesipitoisuudet vaikuttivat ekstrudaattien ominaisuuksiin (vesipitoisuus, ekspansio ja kovuus) ja aistinvaraiseen laatuun.</p> <p>Kokeet toteutettiin kaksiruuviekstruderilla, ja ekstrudaattien pääraaka-aineena oli kaurajauhon ja vahamaisen maissitärkkelyksen seos. Kokeissa käytettiin kolmea eri maitojauhetta (yksi laktoosia sisältävä ja kaksi laktoositonta rasvatonta maitojauhetta) siten, että massan maitoproteiinipitoisuudet olivat 8, 10 ja 12 % (kuiva-aineesta) ja vesipitoisuudet 14, 16 ja 18 %. Lisäksi arvioitiin maitojauheiden sokerikoostumuksen (laktoosi vs. glukoosigalaktoosiseos) ja -pitoisuuden (maitosokeripitoisuuden alentaminen noin 60 %:iin kuiva-aineesta) vaikutusta ekstruusiassa. Ekstrudaateista mitattiin vesipitoisuutta, kovuutta ja ekspansiota. Aistinvaraisessa arvioinnissa (n = 6) vertailtiin eri maitojauheiden ja massan vesipitoisuuksien vaikutuksia ekstrudaateissa.</p> <p>Laktoosia sisältävällä maitojauheella saatiin ekspandoituneempia ja vähemmän kovia ekstrudaatteja kuin laktoosittomilla maitojauheilla. Sokeripitoisuuden alentaminen ei vaikuttanut ekstrudaattien ominaisuuksiin merkittävästi. Massan maitoproteiinipitoisuuden lisääminen lisäsi ekstrudaatille tyypillisiä positiivisia ominaisuuksia, kun maitojauheena käytettiin laktoosia sisältävää jauhetta, mutta laktoosittomilla maitojauheilla vaikutus oli päinvastainen. Massan vesipitoisuuden lisääminen vähensi ekstrudaattien ekspansiota ja lisäsi kovuutta. Aistinvaraisessa arvioinnissa suurimmat erot havaittiin ekstrudaattien värin tummuudessa ja halkaisijassa.</p> <p>Tämän tutkimuksen tulosten perusteella sekä laktoosia sisältävän että laktoosittoman maitojauheen käyttämisellä on mahdollista saada rakenteeltaan hyvälaatuisia ekstrudaatteja. Laktoosia sisältävä maitojauhe saattaa kuitenkin olla ekstruusion kannalta parempi vaihtoehto kuin laktoositon maitojauhe. Laktoosittomia maitojauheita sisältävien ekstrudaattien sokeripitoisuutta saattaa olla mahdollista pienentää jonkin verran ilman, että ekstrudaattien rakenne tai aistinvarainen laatu heikkenee merkittävästi.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Ekstruusio, maitojauhe, laktoosi, kaurajauho, vahamainen maissitärkkelys, ekspansio, kovuus			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston digitaalinen arkisto, Helda			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information EKT-sarja 1901			

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos/Institution– Department Department of Food and Nutrition	
Tekijä/Författare – Author Janne Rauta			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Effect of milk powders on texture and sensory quality of extrusion product			
Oppiaine / Läroämne – Subject Food Technology			
Työn laji/Arbetets art – Level Master's thesis	Aika/Datum – Month and year May 2019	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 83	
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Extrusion is a versatile thermomechanical food processing technology, and cereal based snack products made with extrusion are one of the most significant ready-to-eat products. The literature review covered extrusion process in general while the effect of different components of grain and milk powders in extrusion was examined more closely, and also different methods to evaluate the properties and the quality of extrusion products were examined. The objective of the experimental study was to study the effects of sugar content and composition as well as the effects of different milk protein and water contents of the mass on the properties (water content, expansion and hardness) and organoleptic quality of extrudates.</p> <p>Experiments were carried out by using twin-screw extruder and the main component of extrudates was a mixture of oat flour and waxy maize starch. Three different milk powders were used (one lactose-containing and two lactose-free skimmed milk powders) in experiments, so that the milk protein content of mass was 8, 10 and 12 % (from solids) and water content 14, 16 and 18 %. The effect of sugar composition (lactose vs. glucose/galactose mixture) and sugar content (lowering the milk sugar content to about 60 % from solids) in extrusion was also examined. The water content, hardness and expansion of extrudates were measured. In sensory analysis (n=6) the effect of different milk powders and water contents on extrudates were evaluated.</p> <p>More expanded and less hard extrudates were obtained by adding milk powder that contained lactose compared to lactose-free milk powders. Lowering the sugar content did not affect the properties of extrudates significantly. Increasing the milk protein content of the mass increased the typical positive features of extrudates when lactose-containing milk powder was used, but when lactose-free milk powders were used the effect was the opposite. Increasing the water content of the mass decreased the expansion and increased the hardness of extrudates. In sensory analysis the major differences were observed in the darkness of color and the diameter of the extrudates.</p> <p>According to the results of the present study it is possible to obtain extrudates with good structure using lactose-containing milk powder as well as lactose-free milk powder. However, lactose-containing milk powder may be a better alternative in extrusion compared to the lactose-free milk powder. It may be possible, to some extent, to lower the sugar content of the extrudates that contain lactose-free milk powders without compromising the structural and organoleptical quality of the extrudates.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Extrusion, milk powder, lactose, oat flour, waxy maize starch, expansion, hardness			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited The Digital Repository of University of Helsinki, Helda			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information EKT Series 1901			

ESIPUHE

Tämän maisterin tutkielman työn kokeellinen osuus toteutettiin ekstruusioajojen ja fysikaalisten mittausten osalta Helsingin yliopiston elintarvike- ja ravitsemustieteiden osastossa. Aistinvarainen arviointi toteutettiin Valio Oy:n tiloissa Helsingin Pitäjänmäessä. Työn tilaajana ja rahoittajana toimi Valio Oy. Työn ohjaajana ja valvojana toimi yliopiston puolelta yliopistonlehtori Kirsi Jouppila, ja Valion puolelta ohjaajana toimi Terhi Aaltonen.

Suuret kiitokset Kirsi Jouppilalle asiantuntevista ja arvokkaista neuvoista kaikissa tutkielman eri vaiheissa. Kiitokset Terhi Aaltoselle etenkin käytännön asioiden täsmällisestä ja nopeasta hoitamisesta sekä muista neuvoista liittyen tutkielmaan. Haluan myös kiittää tutkimuksen eri vaiheissa avustaneita henkilöitä: Mikko Kangas ja Asmo Kemppinen, kiitokset ekstruusioajoissa avustamisesta, ja Seppo Tenitz, kiitos opastuksesta tilastollisten analyysien suhteen.

Lopuksi haluan vielä kiittää perhettäni ja ystäviäni. Teidän ansiostanne minulla oli opiskelun ohella myös muuta mielekästä tekemistä, ja ilman teitä tutkielman tekeminen olisikin ollut huomattavasti raskaampaa.

Helsingissä toukokuussa 2019

Janne Rauta

SISÄLLYSLUETTELO
TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ESIPUHE

1	JOHDANTO	6
2	KIRJALLISUUSKATSAUS	9
2.1	Keittoekstruusio elintarviketeollisuudessa.....	9
2.1.1	Keittoekstruusioon vaikuttavat tekijät.....	9
2.1.2	Viljan käyttö ekstruusiotuotteissa	13
2.1.3	Viljan eri komponenttien vaikutus ekstruusiossa	15
2.1.4	Lisätyn sokerin merkitys ekstruusiossa.....	18
2.1.5	Ekstruusiotuotteiden päällystäminen	20
2.2	Maito- ja herajauheiden käyttö ekstruusiotuotteissa	22
2.2.1	Maito- ja herajauheet yleisesti	22
2.2.2	Maitoproteiinit ekstruusiossa	24
2.2.3	Maitojauheen sokerit.....	26
2.3	Ekstruusiosprosessin ja -tuotteiden tutkiminen	28
2.3.1	Objektiiviset menetelmät	28
2.3.2	Subjektiiiviset menetelmät	30
2.3.3	Tulosten analysointi ja koeasetelman valinta.....	32
3	KOKEELLINEN TUTKIMUS	36
3.1	Materiaalit ja menetelmät	36
3.1.1	Materiaalit.....	36
3.1.2	Esikokeet.....	36
3.1.2	Ekstruusio	37
3.1.3	Vesipitoisuuden, ekspansion ja kovuuden määrittäminen.....	40
3.1.4	Aistinvarainen arviointi.....	42
3.1.5	Tulosten käsittely	43
3.2	Tulokset	43
3.2.1	Ekstrudaattien ulkonäkö ja aistinvarainen arviointi	43
3.2.2	Ekstrudaattien ominaisuudet ja ekstruusioajojen mittaustulokset	48
3.2.3	Keskipistemittaukset	54
3.2.4	Regressioanalyysin tulokset	56
3.3	Pohdinta	62
3.3.1	Maitojauheiden vertailu	62
3.3.2	Selittävien muuttujien vaikutus ekstruusiossa.....	65
4	PÄÄTELMÄT	70
	LÄHDELUETTELO	72
	LIITTEET	

Liite 1. Maitojauheiden erot aistinvaraisessa arvioinnissa

Liite 2. Ekstruusioajojen ja ekstrudaattien mittaustulokset

Liite 3. PLSR-analyysin korrelaatiotaulukko

Liite 4. Split-plot-kokeiden koejärjestys

Liite 5. Split-plot-kokeiden malli selittävien muuttujien osalta

Liite 6. Split-plot-kokeissa saatujen vastemuuttujien mitatut arvot ja jäännösarvot

1 JOHDANTO

Ekstruusio on monikäyttöinen lämpömekaaninen elintarvikkeiden prosessointimenetelmä, jolla valmistetaan monia eri tuotteita, kuten aamiaismuroja, välipala- ja konditoriotuotteita, keksejä, pastaa, soijapohjaisia lihankorvikkeita ja lemmikkien ruokia (kuva 1) (Singh ym. 2007). Ekstruusiossa yhdistyvät useat yksikköoperaatiot: sekoitus, keitto, vaivaus, leikkaus ja muovaus (Fellows 2000). Ekstruusio voidaan toteuttaa joko kylmä- tai keittoekstruusiolla käyttäen yksi- tai kaksiruuviekstruuderia. Tässä tutkielmassa keskitytään pääosin keittoekstruusioon, jolla tarkoitetaan ekstruusiota, jossa massan lämpötila nousee prosessin aikana yli 100 °C:seen.

Viljapohjaisten valmistuotteiden kysyntä kasvaa koko ajan, sillä ne ovat helposti nautittavia, hyvin säilyviä ja rakenteeltaan miellyttäviä (Brennan ym. 2013). Merkittävä osa näistä tuotteista valmistetaan keittoekstruusiolla, ja usein käytetään pitkälle prosessoitua viljaa, jolloin tuotteen ravitsemuksellinen laatu on heikompi kuin esimerkiksi kokojyväviljasta valmistetun tuotteen. Kuluttajien lisääntynyt kiinnostus terveellisempiä elintarvikkeita kohtaan pakottaa kuitenkin ekstruusiotuotteita valmistavia yrityksiä kehittämään yhä terveellisempiä tuotteita.



Kuva 1. Erilaisia ekstruusiolla valmistettuja elintarvikkeita (Moscicki ja Zuilichem. 2011).

Kaura on yksi potentiaalinen pääraaka-aine ekstruusiotuotteille, sillä kaura sisältää useita terveyttä edistäviä ainesosia, kuten monia vitamiineja ja runsaasti kuitua, joista

merkittävimpänä β -glukaani (Poutanen ym. 2010). Kauran käyttöön voi kuitenkin liittyä ongelmia ekstruusiassa, sillä kaurassa on korkea kuitu- ja rasvapitoisuus sekä matala tärkkelyspitoisuus, joiden seurauksena ekstrudaattien rakenne saattaa jäädä kovaksi ja ekspansio vähäiseksi (Rzedzicki 1998; Guy 2001; Yanniotis ym. 2007). Kaurapohjaisen jauheseoksen koostumusta saattaa kuitenkin olla mahdollista parantaa esimerkiksi käyttämällä rasvatonta kaurajauhoa tai lisäämällä vahamaista maissitärkkelystä, jolloin seoksen tärkkelyspitoisuutta ja -koostumusta saadaan säädettyä optimaalisemmaksi ekstruusion kannalta (Syed 2012; Sibakov ym. 2014).

Toinen potentiaalinen raaka-aine ekstruusiotuotteiden laadun parantamiseksi on maitoproteiini. Maitoproteiinit, etenkin heraproteiinit, sisältävät runsaasti korkealaatuisia proteiineja, joilla voidaan parantaa ekstruusiotuotteiden ravitsemuksellista laatua (Singh ym. 1991). Pienissä pitoisuuksissa maitoproteiinit (<5 %) voivat toimia myös funktionaalisina komponentteina parantaen ekstrudaattien rakennetta, mutta korkeammissa pitoisuuksissa (>10 %) vaikutus on kuitenkin usein päinvastainen (Singh ym. 1991; Onwulata ym. 1998). Käytettävän viljan koostumuksella on suuri merkitys maitoproteiineja sisältävän ekstrudaatin rakenteeseen, sillä viljan tärkkelys muodostaa maitoproteiinien kanssa ekstrudaatin rakenteeseen vaikuttavan proteiini-tärkkelyskompleksin (Kumar ym. 2016).

Maailmalla yleisesti esiintyvistä laktoosi-intoleranssista johtuen maidosta ja maitotuotteista on valmistettu useita laktoosittomia tai vähälaktoosisia tuotteita, kuten laktoosittomia maitojauheita (Shrestha ym. 2007). Laktoosi on disakkaridi, joka voidaan hydrolysoida laktaasientsyymien avulla kahdeksi monosakkariksi, glukoosiksi ja galaktoosiksi (Morrissey 1985). Glukoosilla ja galaktoosilla saattaa olla erilainen vaikutus ekstruusiassa verrattuna laktoosiin muun muassa niiden erilaisen lasisiirtymälämpötilan ja Maillard-reaktion vuoksi (Ames 1990; Roos ja Karel 1991). Glukoosi ja galaktoosi ovat myös huomattavasti makeampia kuin laktoosi, jolloin käyttämällä maitojauhetta, jossa laktoosi on hydrolysoitu, voidaan mahdollisesti saada makeampia ekstruusiotuotteita kuin laktoosia sisältävällä maitojauheella, vaikka käytettävät maitojauhepitoisuudet olisivatkin samat (Moskowitz 1970).

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka maitojauheen sokerikoostumus (laktoosi vs. glukoosi-galaktoosiseos) ja -pitoisuus (maitosokeripitoisuuden alentaminen noin 60 %:iin kuiva-aineesta) vaikuttivat keittoekstruusiolla valmistettujen kaura-maissipohjaisten

ekstrudaattien ominaisuuksiin (vesipitoisuus, ekspansio ja kovuus) ja aistinvaraiseen laatuun. Lisäksi tutkittiin eri maitoproteiini- ja vesipitoisuuksien vaikutusta ekstrudaattien ominaisuuksiin ja aistinvaraiseen laatuun. Hypoteesinä oli, että maitoproteiinipitoisuuden lisääminen pienentäisi ekstrudaattien ekspansiota ja lisäisi kovuutta, minkä lisäksi laktoosia sisältävien ekstrudaattien oletettiin olevan ekspandoituneempia ja vähemmän kovia kuin laktoosittomien ekstrudaattien. Ennen varsinaisia kokeita suoritettiin kolme esikoetta, joilla selvitettiin perusmassan reseptiikkaa ja ekstruusion kannalta optimaaliset prosessointiparametrit (ruuvien pyörimisnopeus, lämpötilaprofiili ja syöttönopeus).

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Keittoekstruusio elintarviketeollisuudessa

Merkittävä osa viljapohjaisista valmistuotteista, kuten monet aamiaismurot ja välipalakeksit/patukat, valmistetaan keittoektruusiolla joko yksi- tai kaksiruuviekstruuderilla (Brennan ym. 2013). Ekstruusion toimintaperiaate on sama riippumatta käytetäänkö keitto- tai kylmäekstruusiota tai yksi- tai kaksiekstruuderia (Fellows 2000). Ekstruusiossa materiaali syötetään kammioon, jossa ruuvi(t) kuljettaa massaa eteenpäin. Massan edetessä kammiossa siihen kohdistuvat leikkausvoimat kasvavat ruuvien ja kammion välisen tilavuuden pienentyessä, jolloin massa tiivistyy ja vaivautuu puolikiinteäksi, pehmeäksi massaksi. Massan lämpötilan noustessa yli 100 °C:seen puhutaan keittoekstruusiossa. Tällöin hankauskitka ja ekstruuderin oma lämmitysjärjestelmä aiheuttavat massan nopean lämmön nousun. Lopuksi massa pakotetaan yhden tai useamman suuttimen läpi, jolloin siinä oleva paine purkautuu. Paineen purkautuessa massassa oleva vesi höyrystyy laajentaen massaa. Tämän endotermisen reaktion ja ympäristön matalamman lämpötilan seurauksena massa viilenee ja kovettuu nopeasti, jolloin muodostuu huokoinen lasitilassa oleva amorfinen materiaali. Massan laajenemisesta voidaan käyttää termiä ekspansio, joka ilmaisee, kuinka paljon massan halkaisija muuttuu suhteessa suuttimen halkaisijaan, kun massa tulee ulos suuttimesta.

2.1.1 Keittoekstruusioon vaikuttavat tekijät

Keittokstruusio on ainutlaatuinen elintarvikkeiden prosessointimenetelmä, sillä siinä raaka-aine käy läpi poikkeuksellisen prosessin ekstruusion olosuhteista johtuen, joita ovat muun muassa korkea lämpötila, paine ja leikkausvoima mutta suhteellisen lyhyt prosessointiaika (Guy 2001). Keittoekstruusiossa käytettävällä raaka-aineella, joka useimmiten on vilja, on erittäin tärkeä rooli ekstrudaatin rakenteeseen ja aistinvaraiseen laatuun (Zuilichem ym. 2011). Ekstruusion kannalta merkittävimmät ominaisuudet ovat käytettävän raaka-aineen, kuten viljan, laji (mm. vehnä, maissi tai kaura), kemiallinen koostumus (mm. tärkkelys-, proteiini- ja rasvapitoisuus), fysikaaliset ominaisuudet (mm. partikkelikoko, kovuus ja vettymisominaisuudet), vesipitoisuus ja pH (Fellows 2001). Raaka-aineen koostumus, vesipitoisuus ja partikkelikoko vaikuttavat massan viskositeettiin, jolla on merkittävä rooli ekstruusio prosessin kannalta.

Vedellä on tärkeä rooli ekstruusiassa sen lämmönsiirto-ominaisuuksien vuoksi (Guy 2001). Guerrero ym. (2012) havaitsivat, että vesipitoisuuden lisääntyessä lämpöä siirtyi enemmän ekstruusion putkesta ekstruusiomassaan, minkä seurauksena massan viskositeetti ja ekstruusion aikainen leikkausvoima ja kitka pienenevät. Tämän seurauksena tarvittiin vähemmän voimaa pakottamaan ekstruusiomassa suuttimen läpi, jolloin ekstruusion aikainen vääntömomentti ja paine suuttimella pienenevät. Vääntömomentin ja paineen muuttuminen taas vaikuttavat merkittävästi lopputuotteen ominaisuuksiin, kuten kovuuteen ja ekspansioon. Vesi toimii myös pehmentimenä (Guy 2001), ja Fan ym. (1996) havaitsivatkin, että vesipitoisuuden lisääminen laskee ekstruusiomassan lasisiirtymälämpötilaa, mikä taas johti viskositeetin pienemiseen. Tyypillisesti ekstruusiassa käytetään suhteellisen pieniä vesipitoisuuksia (10–40 %) verrattuna esimerkiksi perinteiseen leipomiseen (Guy 2001). Etenkin viljapohjaisissa ekstruusiotuotteissa toivottuja ominaisuuksia ovat suuri ekspansio ja huokoisuus, jolloin kovuus on usein pieni. Ekstrudaatin laadun kannalta pieni vesipitoisuus on toivottua, sillä suurissa vesipitoisuuksissa (>20 %) tuotteesta tulee usein erittäin kova, jolloin ekspansio ja huokoisuus jäävät vähäiseksi. Toisaalta korkeissa vesipitoisuuksissa tuotteen ravitsemuksellinen laatu säilyy parempana kuin pienissä vesipitoisuuksissa (<15 %) (Singh ym. 2007).

Raaka-aineen lisäksi käytetyillä prosessointiparametreilla on merkittävä rooli ekstrudaatin laadun kannalta (Zuulichem ym. 2011). Tärkeimmät säädettävät prosessointiparametrit ovat ruuvien pyörimisnopeus, ekstrudaatin kammion lämpötilaprofiili ja raaka-aineen syöttönopeus. Lisäksi voidaan muuttaa laitteen kokonpanoa, kuten suuttimen kokoa ja muotoa. Parametrien hallitsemista vaikeuttaa se, että etenkin kasvipohjaista massaa käytettäessä massan virtaus kammiossa ei ole tasaista (ei-newtoninen fluidi) eikä sen lämpötila ole vakio (ei-isoterminen virtaus). Ekstruusiassa massan virtauksen ymmärtäminen on tärkeää, jotta ekstrudaatin suorituskyky ja ekstrudaattien laatu säilyvät hyvänä (Bouvier ja Campanella 2014). Massan virtaus on erilaista ekstruuderin eri osissa, sillä ekstruusion alkuvaiheessa massan ollessa kiinteää virtaus perustuu massan ja ruuvien väliseen kitkaan, kun taas myöhemmässä vaiheessa massan ollessa sulaa virtaus perustuu sulan massan reologisiin ominaisuuksiin (mm. viskositeettiin). Oikeanlaisen suuttimen valinnalla voidaan tasapainottaa suuttimesta tulevan massan virtausta. Lisäksi on otettava huomioon ekstruuderin tyyppi, sillä yksi- ja kaksiruuviekstruudereissa on suuria eroja (Yacu 2012). Kaksiruuviekstruuderin (engl. twin-screw extruder, TSE) käyttäminen helpottaa massavirran hallintaa, sillä siinä maassa kulkeutuu tehokkaasti ruuveja pitkin.

TSE:ssä ruuvien pyörimissuunnalla (samaa tai eri suuntaan pyörivät ruuvit) voidaan lisäksi vaikuttaa massan virtaukseen.

TSE on nopea, jatkuvakäyttöinen ja helposti huollettava, ja siinä voidaan käyttää monia eri raaka-aineita tuotteiden ollessa tasalaatuisia (Le Corre 2006). TSE:llä voidaan valmistaa tuotteita korkeissa paineissa ja vesipitoisuuksissa sekä käsitellä eri partikkelikoon raaka-aineita säilyttäen yhdenmukainen leikkausjännitys ja massavirta. TSE:llä saadut tuotteet voivat olla joko suoraan laajenevia tai epäsuorasti laajenevia riippuen käytetyistä asetuksista. Suoraan laajenevat tuotteet laajenevat välittömästi, kun ne poistuvat suuttimesta veden haihtuessa nopeasti. Tällöin käytetään suuria leikkausvoimia, korkeita lämpötiloja ja pieniä vesipitoisuuksia. Epäsuoralla asetuksella tuotteet eivät laajene välittömästi, vaan vasta myöhemmin prosessissa. TSE on hyvin yleisesti käytetty menetelmä etenkin aamiaismurojen valmistuksessa.

Välipalatuotteiden valmistuksessa käytetään yleisesti keittoekstruusiota, sillä korkeissa lämpötiloissa (yli 100 °C) ekstrudaattien ekspansio kasvaa, jolloin tuotteelle saadaan haluttu huokoinen rakenne (Brennan ym. 2013). Keittoekstruusiassa lämpö voi olla lähtöisin joko ekstruuderin omasta lämmitysjärjestelmästä tai mekaanisesta lämpenemisestä, joka syntyy, kun massa kohdistuu leikkausvoimia ruuvien pyöriessä (Mottaz ja Bruyas 2001). Lopputuotteen laatu on hyvin riippuvainen ekstruuderin lämpötilaprofiilista, joten lämpötilan hallinnan ja säätelyn tulee olla optimoitu. Ekstruusiomassan lämpötilan noustessa sen viskositeetti pienenee, mikä taas johtaa vääntömomentin pienenemiseen (Yacu 2012). Ekstruuderin kammio voidaan jakaa eri lohkoihin, joiden lämpötilaa voidaan säätää lämmittämällä tai jäähdyttämällä. Monissa ekstruusiotutkimuksissa, tämä tutkimus mukaan lukien, lämpötilaprofiili on sellainen, että lämpötila kasvaa, kun edetään kohti suutinta, jolloin korkein lämpötila on viimeisen lohkon ja/tai suuttimen kohdalla (Onwulata ym. 2001; Walsh ym. 2010; Kirjoranta ym. 2012). Maitoproteiineja sisältävien välipalatuotteiden valmistuksessa on tyypillisesti käytetty 110–150 °C:n lämpötiloja (suuttimen lämpötila) (Onwulata ym. 1998; Onwulata ym. 2001; Walsh ym. 2010; Kirjoranta ym. 2012; Banach ym. 2016).

Ekstruuderin ruuvien pyörimisnopeus vaikuttaa massan reologisiin ominaisuuksiin, ja kaksiruuviekstruudereissa pyörimisnopeus on tyypillisesti 300–600 rpm (Moscicki ja Zuilichem 2011). Pyörimisnopeuden lisäämisen on todettu pienentävän ekstrudaattien tiheyttä ja ekstruusion aikaista vääntömomenttia ja painetta suuttimella mutta lisäävän

spesifistä mekaanista energiaa (SME) ja ekstrudaattien ekspansiota (Ding ym. 2006; Kirjoranta ym. 2012; Yacu 2012). SME kertoo materiaaliin käytetyn energian määrästä, ja se voidaan laskea vääntömomentin, ruuvien pyörimisnopeuden ja massan syöttönopeuden avulla (Zuilichem ym. 2011).

TSE:ssä massan syöttönopeus vaikuttaa ekstruuderin kammion täyttöasteeseen ja aikaan, jonka massa viettää kammiossa (Seker 2012). Syöttönopeuden lisääminen lisää vääntömomenttia ja painetta suuttimella mutta pienentää SME:tä. Toisaalta syöttönopeuden lisääminen nopeuttaa massan kulkua putkessa ja parantaa homogeenisuutta. TSE:ssä käytetyt syöttönopeudet vaihtelevat hyvin paljon riippuen ekstruuderin koosta. Useissa tutkimuksissa pienemmillä ekstruudereilla syöttönopeuksina on käytetty tyypillisesti 40–80 g/min, kun taas suuremmilla ekstruudereilla syöttönopeudet ovat olleet jopa 10-kertaa suurempia (Liu ym. 2000; Onwulata ym. 2001; Allen ym. 2007; Kirjoranta ym. 2012; Sibakov ym. 2015).

Ekstruusion aikana voidaan seurata tiettyjä prosessin onnistumisen kannalta merkittäviä vastemuuttujia (Yacu 2012). Näitä ovat muun muassa vääntömomentti, massan lämpötila, paine suuttimella ja ekstrudaatin tiheys. Selittävät muuttujat, joita ovat prosessointiparametrit ja käytettävä materiaali, vaikuttavat näihin vastemuuttujiin (taulukko 1). Tiheyttä voidaan arvioida karkeasti ekspansion kannalta, sillä ekspansion kasvaessa tiheys usein pienenee. Ekstruusiossa on myös tärkeää ottaa huomioon massan viipymäaika ekstruuderissa, sillä aika vaikuttaa materiaalin sekoittumiseen, plastisoitumiseen ja massan tasaisuuteen. Aika on riippuvainen ruuvien pyörimisnopeudesta, pituudesta ja rakenteesta, suuttimen rakenteesta ja massan syöttönopeudesta. Käytettävä materiaali ja prosessointiparametrit ovat hyvin vahvasti linkittyneet toisiinsa, jolloin samalla raaka-aineella voidaan saada hyvin erilainen tuote, kun prosessointiparametrejä muutetaan (Fellows 2001).

Taulukko 1. Prosessointiparametrien ja materiaalin vaikutus (selittävät muuttujat) ekstruusio-olosuhteisiin ja ekstrudaatin ominaisuuksiin (vastemuuttujat) (Yacu 2012).

Selittävät muuttujat	Vastemuuttujat				
	SME	vääntömomentti	T	p	ρ
virtausta vastustava ruuvien muotoilu	↑	↑	↑	↓	↓
virtausta vastustava suuttimen muotoilu	↑	↑	↑	↑	↓
kammion lämpötila ↑	↓	↓	↑	↓	↓
ruuvien pyörimisnopeus ↑	↑	↓	↑	↓	↓
syöttönopeus ↑	↓	↑	↓	↑	↑
massan vesipitoisuus ↑	↓	↓	↓	↓	↑
massan rasvapitoisuus ↑	↓	↓	↓	↓	↑
massan sokeripitoisuus ↑	↓	↓	↓	↓	↑
runsaasti vettä imevä kuitu ↑	↑	↑	↑	↑	↑
vähän vettä imevä kuitu ↑	↓	↓	↓	↓	↑
runsaasti vettä imevä proteiini ↑	↑	↑	↑	↑	↑
vähän vettä imevä proteiini ↑	↓	↓	↓	↓	↑

SME = spesifinen mekaaninen energia, T = massan lämpötila suuttimella, p = paine suuttimella, ρ = tuotteen tiheys.

2.1.2 Viljan käyttö ekstruusiotuotteissa

Keittoekstruusiolla, jossa käytetään korkeita lämpötiloja ja lyhyitä prosessointiaikoja, voidaan valmistaa erilaisia viljapohjaisia valmistuotteita, kuten välipalatuotteita ja aamiaismuroja, jolloin lopputuotteena on tilavuudeltaan laajentunut ja rapea tuote (Kumar ym. 2016). Erilaisten valmistuotteiden käyttö on lisääntynyt maailmanlaajuisesti, ja viljapohjaiset ekstruusiotuotteet ovat yksi merkittävimmistä valmistuoteryhmistä (Brennan ym. 2013). Viljojen tuotanto ja käyttö on myös lisääntynyt maailmanlaajuisesti viime vuosina (FAO 2018). Ekstruusiossa eniten käytettyjen viljojen, maissin, vehnän ja riisin, ennustetaan kattavan jopa 86 % koko maailman viljantuotannosta vuosina 2017/18 (Brennan ym. 2013; FAO 2018; USDA 2018). Suomessakin runsaasti viljelty kaura on kuitenkin säilyttänyt hyvin asemansa maailman viljamarkkinnoilla, vaikkakin peräti 74 % (vuosina 1995–2005) maailmalla tuotetusta kaurasta käytettiin eläinten rehuksi (Menon ym. 2016).

Jalostettujen viljojen käyttö on tyypillisesti ollut suosittua ekstruusiolla valmistetuissa valmistuoteryhmissä, sillä jalostetusta viljasta saadut vaaleat, rakenteeltaan korkealaatuiset ja maultaan hyvät tuotteet ovat usein kuluttajille mieluisia (Brennan ym. 2013). Viljojen jalostamisella saadaan jauheen tärkkelyspitoisuutta lisättyä ja toisaalta kuitupitoisuutta

pienennettyä, jolloin jauheella saadaan helposti valmistettua ekspandoituneita ja huokoisia ekstruusiotuotteita (Guy 2001). Toisaalta, jalostaminen heikentää tuotteen ravitsemuksellista laatua, sillä verrattuna esimerkiksi täysjyväviljoihin, joissa on runsaasti kuituja ja fytokeemikaaleja, jalostetuissa viljoissa tärkkelyspitoisuus on suuri ja kuitu- ja fytokeemikaalien pitoisuus pieni (Brennan ym. 2013). Täysjyväviljan tai täysjyväkomponenttien hyödyntämistä erilaisissa valmistuotteissa onkin alettu tutkia yhä laajemmin niiden tuomien positiivisten terveysvaikutusten vuoksi (Poutanen ym. 2010). Viime vuosina kuluttajien terveystietoisuus on myös lisääntynyt, minkä seurauksena kuluttajat vaativat terveellisempiä mutta samaan aikaan helposti nautittavia ja hyvänmakuisia valmistuotteita (Brennan ym. 2013). Tämä luo haasteita ekstruusiotuotteita valmistaville yrityksille, sillä reseptiikan (esim. tärkkelyspitoisuuden vähentäminen ja kuitupitoisuuden lisääminen) ja prosessointiparametrien muuttaminen aiheuttavat muun muassa kovuuden lisääntymistä, ekspansion pienentymistä ja aistinvaraisen laadun heikentymistä.

Kaura on yksi potentiaalinen raaka-aine ekstruusiotuotteille, sillä se sisältää runsaasti terveyttä edistäviä ainesosia, kuten β -glukaania, monia vitamiineja, mineraaleja ja fytokeemikaaleja, ja lisäksi gluteenittomana viljana kaura soveltuu myös keliakikoille (Poutanen ym. 2010). Kauran korkean kuitu- ja rasvapitoisuuden vuoksi sen käyttöön liittyy kuitenkin ongelmia ekstruusiassa, sillä jo kohtalaisissa pitoisuuksissa sekä kuitu että rasva heikentävät monia ekstruusiotuotteilta vaadittavia rakenneominaisuuksia, kuten ekspansiota ja huokoisuutta (Meuser 2001; Yao ym. 2011). Käyttämällä raaka-aineena rasvatonta kaurajauhoa saattaa olla mahdollista vähentää rasvan haitallisia vaikutuksia, sillä esimerkiksi Sibakov ym. (2014) saivat rakenteeltaan hyvälaatuisia ekstruusiotuotteita, kun he käyttivät raaka-aineena rasvatonta kaurajauhoa. Suomessa eniten viljelty vilja, ohra, on myös potentiaalinen raaka-aine ekstruusiotuotteille, sillä kauran tavoin se sisältää runsaasti terveyttä edistäviä komponentteja (Poutanen ym. 2010; MTK 2017). Ohran soveltuvuudesta ekstruusiassa on myös saatu lupaavia tuloksia (Berglund ym. 1994; Kirjoranta ym. 2012).

Ekstruusio vaikuttaa hyvin monipuolisesti viljan eri komponentteihin, ja ekstruusion aiheuttamat ravitsemukselliset muutokset tuotteeseen ovatkin hyvin monimuotoiset (Singh ym. 2007). Hyödyllisiä muutoksia ovat muun muassa haitallisten yhdisteiden ja mikrobien tuhoutuminen, tärkkelyksen liisteröityminen, liukoisten kuitujen lisääntyminen ja hapettumisreaktioiden väheneminen. Wangin ym. (1993) totesivat, että ekstruusioprosessin

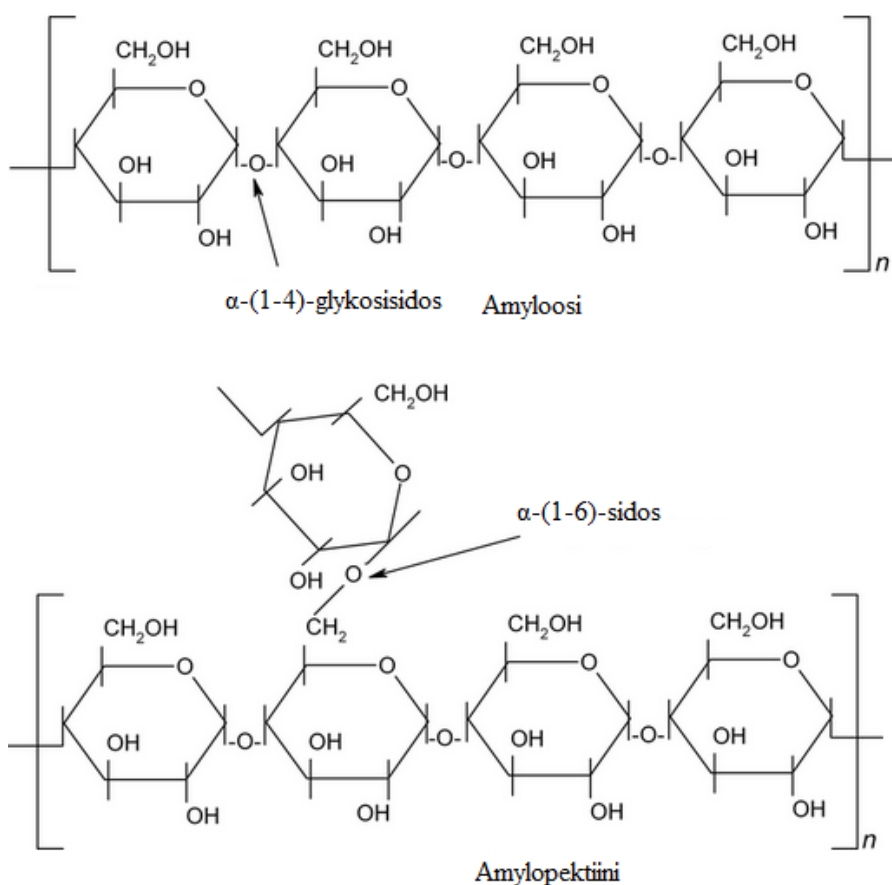
seurauksena tärkkelyksen imeytyvyys saattaa parantua, sillä tärkkelys liisteröityy ja pilkkoutuu osittain ekstruusion aikana. Myös proteiinien imeytyvyys voi parantua ekstruusiosta käytettävien suurten leikkausvoimien seurauksena (Vaz ja Areas 2010; Karkle ym. 2012). Toisaalta ekstruusio voi aiheuttaa proteiinien ravitsemuksellisen laadun heikentymistä Maillard-reaktion ja denaturoitumisen seurauksena (Singh ym. 2007). Vitamiinit voivat myös tuhoutua ekstruusion aikana syntyneiden korkeiden lämpötilojen seurauksena. Raaka-aineiden paremman imeytyvyyden seurauksena ekstruusiotuotteiden glykeeminen indeksi on usein korkea (Brennan ym. 2013). Ekstruusiotuotteiden ravitsemuksellista ja funktionaalista laatua voidaan parantaa lisäämällä tuotteeseen erilaisia ainesosia, kuten proteiineja ja ravintokuituja tai muita bioaktiivisia yhdisteitä (Obradović ym. 2014).

2.1.3 Viljan eri komponenttien vaikutus ekstruusiosta

Viljan pääkomponentilla, tärkkelyksellä, on erityisen tärkeä rooli ekstruusiotuotteille tyypillisen rakenteen muodostuksessa ja ekspansiossa (Kumar ym. 2016). Ekstruusion aikana tapahtuu monia fysikaalis-kemiallisia muutoksia, joista yksi on tärkkelysgeelin muodostuminen tärkkelyksen liisteröitymisen seurauksena (Yao ym. 2011). Liisteröityneellä tärkkelyksellä on merkittävä rooli ekspansion kannalta, sillä se vahvistaa sulan massan kaasunpidätyskykyä (Guy 1994). Viljoista maissi ja riisi sisältävät eniten tärkkelystä, jolloin niiden proteiini- ja kuitupitoisuus on pieni (Guy 2001). Tärkkelysjiyvästen koko ja muoto vaihtelevat huomattavasti riippuen viljasta, jolloin kahdella täysin saman pitoisuuden tärkkelystä sisältävällä ekstrudaatilla voi olla erilainen rakenne riippuen tärkkelysjiyvästen ominaisuuksista. Pienet tärkkelysjiyvät esimerkiksi kuumenevat nopeammin kuin isot jyvät, jolloin ne pehmenevät eri aikaan ekstruusiosta vaikuttaen massan viskositeettiin eri tavalla.

Tärkkelysmolekyylejä on kahta erilaista, amyloosi ja amylopektiini, ja näillä kahdella molekyylillä on erilaiset polymeerikoot ja -muodot, amyloosin ollessa molekyylikooltaan huomattavasti pienempi kuin amylopektiinin (kuva 2) (Guy 2001). Amyloosi on lähes lineaarinen glukoosipolymeeri, kun taas amylopektiini on haaroittunut. Kirjallisuudessa on erilaisia arvioita amyloosin ja amylopektiinin vaikutuksista ekstruusiosta. Guy (2001) ehdottaa, että ekspansion kannalta amyloosi olisi parempi vaihtoehto kuin amylopektiini, sillä pienen molekyylikoon ansiosta amyloosilla on paremmat virtausominaisuudet. Amylopektiini saattaa tosin hajota ekstruusion aiheuttaman kovan leikkausvoiman

seurauksena, jolloin pienentyneellä amylopektiinillä voi olla ekstruusion kannalta suotuisat vaikutukset. Maitoproteiineja sisältävissä ekstrudaateissa amylopektiini saattaa olla parempi vaihtoehto kuin amyloosi, sillä Allenin ym. (2007) mukaan vahamaisen maissitärkkelyksen (99 % amylopektiiniä) todettiin parantavan heraproteiineja sisältävien ekstrudaattien ekspansiota enemmän kuin normaalin maissitärkkelyksen (25 % amyloosia ja 75 % amylopektiiniä). Amyloosi saattoi lineaarisen rakenteensa vuoksi muodostaa helpommin vahvempia vuorovaikutuksia muiden amyloosipartikkeleiden ja maitoproteiinien kanssa kuin haaroittunut amylopektiini. Vahvempien vuorovaikutusten seurauksena amyloosin ja proteiinien vedensidontakyky todennäköisesti pieneni, mikä taas vaikutti negatiivisesti ekspansioon. Vehnässä, rukiissa ja kaurassa amyloosin pitoisuus on tyypillisesti 20–27 % kokonaistärkkelyksestä, ohrassa ja riisissä pitoisuus on 5–30 % ja maississa pitoisuus voi vaihdella 5–70 prosentin välillä (Guy 2001).



Kuva 2. Tärkkelyksen kaksi eri muotoa: lineaarinen amyloosi ja haaroittunut amylopektiini (Visakh 2014).

Elintarviketeollisuus pyrkii vähentämään ekstruusiotuotteiden energiatiheyttä ja edistämään niiden terveysvaikutuksia lisäämällä tuotteisiin kuituja (Robin ym. 2012). Elintarviketta voi kutsua kuidun lähteeksi, mikäli tuote sisältää ravintokuituja vähintään

3g/100 g (EU 2012). Kuidun lisääminen ekstruusiassa saattaa heikentää tärkkelysgeelin rakennetta, jolloin kaasukuplat voivat rikkoutua ennenaikaisesti, ja lisäksi kuidun lisääminen pienentää massan tärkkelyspitoisuutta (Yanniotis ym. 2007). Näiden seurauksena ekstrudaattien ekspansio pienenee ja kovuus kasvaa, jolloin tuote on vähemmän houkutteleva kuluttajan näkökulmasta (Robin ym. 2012). Yaon ym. (2011) mukaan kuituja sisältävien ekstrudaattien ekspansio oli hyvä, kun tärkkelyspitoisuus oli 60–70 % kuiva-aineesta. Kaurajauhon käyttö voi olla ongelmallista ekstruusiassa, sillä se sisältää jopa 10 % kuitua sekä runsaasti rasvaa ja proteiinia (Guy 2001). Lisäksi kaurajauhon tärkkelyspitoisuus on suhteellisen pieni, jopa yli 20 prosenttiyksikköä pienempi kuin maissi- tai riisijauhon.

Ravintokuitu voidaan jakaa veteen liukeneviin ja veteen liukenemattomiin kuituihin (Robin ym. 2012). Liukeneva kuitu näyttäisi olevan parempi vaihtoehto ekstrudaatin rakenteen kannalta kuin liukenematon kuitu, sillä liukeneva kuitu reagoi eri tavalla tärkkelyksen kanssa. Liukenevalla ja liukenemattomalla kuidulla on myös erilaiset veden sorptio-ominaisuudet ja plastisoivat vaikutukset, jonka lisäksi ne käyvät läpi erilaiset fysikaalis-kemialliset prosessit ekstruusion aikana. Jalostettujen viljojen kuitupitoisuus on usein pieni (2–5 %), kun taas täysjyväviljassa kuitua on selvästi enemmän (10–15 %). Korkein kuitupitoisuus on viljojen leseissä (20–90 %). Yleensä viljojen kuitu on liukenematonta, mutta poikkeuksen tekee kaura, jossa suuresta β -glukaanin määrästä johtuen liukenevaa kuitua on noin 50 % kokonaiskuidun määrästä. Korkean lämpötilan ja paineen sekä suuren leikkausvoiman seurauksena liukenevan ja liukenemattoman kuidun suhteet voivat muuttua ekstruusion aikana siten, että liukenevan kuidun määrä lisääntyy ja liukenemattoman pienenee (Björck ym. 1984; Gualberto ym. 1997).

Rasvoilla on tärkeä rooli ekstruusiassa, sillä pienissä pitoisuuksissa (1–2 %) ne toimivat voiteluaineena ekstruuderissa kulkevan massan ja ruuvien välissä (Guy 2001). Suuremmilla pitoisuuksilla (>2 %) rasvat saattavat vähentää massan partikkelien sekä massan ja ruuvien välistä kitkaa niin paljon, että tärkkelysjyväset eivät enää hajoa ekstruusion aikana. Tällöin tärkkelysjyväset saattavat sulaa, jolloin ekstrudaatti kypsyy eikä siten ekspandoidu. Rasva myös vähentää suuttimen kitkaa, jolloin vääntömomentti laskee aiheuttaen paineen alenemisen ekstruusion aikana. Täysin rasvattoman raaka-aineen käyttö sen sijaan voi aiheuttaa ongelmia massan kuumenemisen seurauksena, joka johtuu lisääntyneestä kitkasta massan ja ruuvien välillä. Kuumeneminen aiheuttaa massan polymeerien hajoamista, jonka seurauksena massa muuttuu ruskeaksi ja tahmeaksi. Kaura

on yksi runsaasti rasvaa sisältävistä viljoista, ja kauran sisältämän rasvan on todettu heikentävän ekspansiota (Rzedzicki 1998). Rasvattomalla kauralla on kuitenkin saatu lupaavia tuloksia ekstruusiassa, sillä esimerkiksi Sibakov ym. (2015) tutkivat rasvattoman täysjyväkaurajauhon ja viidellä eri tavalla käsitellyn kauraleseen ja rasvattoman endospermisen kaurajauhon yhdistelmän ekstruusiota. Pelkällä täysjyväkaurajauholla tuotteen ekspansio oli huono ja rakenne kova, mutta kauraleseen ja endospermisen kaurajauhon yhdistelmällä saatu tuote oli huomattavasti parempi.

Viljojen proteiinit vaikuttavat ekstruusiomassan viskositeettiin ja tästä johtuen sen virtausominaisuuksiin (Fellows 2000). Proteiinit denaturoituvat korkean lämmön seurauksena ja muodostavat ekstruusiassa olevien ainesosien kanssa yhtenäisen, pehmeän massan. Massan tullessa ulos suuttimesta proteiinit uudelleenjärjestäytyvät auttaen ekstrudaatille tyypillisen rakenteen muodostumisessa. Proteiinien monimuotoisuudesta johtuen proteiinien vaikutuksesta ekstrudaatin rakenteeseen on mahdotonta tehdä yksiselitteisiä johtopäätöksiä (Day ja Swanson 2013). Proteiinien käyttäytymiseen vaikuttavat monet seikat, kuten ajoparametrit, massan vesipitoisuus, proteiinien laatu ja määrä sekä muut vaikuttavat aineet, kuten sokeri ja suola. Ekstruusion on todettu muokkaavan proteiineja helpommin imeytyvään muotoon välipalatuotteissa (Vaz ja Areas 2010; Karkle ym. 2012). Elintarviketta voi kutsua proteiinin lähteeksi, kun vähintään 12 prosenttia elintarvikkeen energiasisällöstä muodostuu proteiinista (Ruokavirasto 2019).

2.1.4 Lisätyn sokerin merkitys ekstruusiassa

Viljapohjaisiin välipalatuotteisiin lisätään usein sokeria ja suolaa halutun rakenteen ja aistinvaraisen profiilin luomiseksi (Hsieh ym. 1993). Sokerilla ja suolalla on todettu olevan synergisiä vaikutuksia ekstruusiassa, jolloin niiden yhteisvaikutuksella voi olla merkittävä vaikutus lopputuotteen laatuun ja siten tuotteen hyväksyttävyyteen (Pitts ym. 2014). Korkean sokerin ja suolan saannin terveyden kannalta epäedullisten vaikutusten vuoksi elintarviketeollisuuden yksi tärkeistä tavoitteista on kuitenkin näiden komponenttien vähentäminen ekstruusiotuotteissa.

Sokereiden vaikutusta ekstruusioon ja ekstrudaattien laatuun on tutkittu laajasti. Maissipohjaisessa tuotteessa sokerin lisäämisen suurissa pitoisuuksissa (10–50 %) on todettu lisäävän ekstrudaattien tiheyttä ja kutistumista sekä pienentävän ekspansiota (Jin ym. 1994; Fan ym. 1996; Carvalho ja Mitchell 2000; Pitts ym. 2014). Näiden ei-toivottujen

muutosten on katsottu johtuvan ilmakuplien seinämien heikentymisestä ja ilmakuplien kasvun vähenemisestä, mikä taas johtuu pienentyneestä tärkkelyksen määrästä ja sitä kautta heikommasta tärkkelysgeelistä (Carvalho 2000). Sokerin lisäämisen on todettu myös alentavan sulan massan lasisiirtymälämpötilaa, minkä seurauksena ekstrudaatit kutistuvat yhä laajemmalla lämpötila-alueella (Fan ym. 1996). Sokeri saattaa myös viivästyttää tärkkelyksen liisteröitymistä, jolloin massan viskositeetti jää pieneksi (D'Appolonia 1972). Sokerin koostumuksella voi olla myös vaikutusta ekstruusiossa, sillä Fanin ym. (1996) mukaan monosakkaridien lisääminen (mm. glukoosi ja galaktoosi) pienensi ekspansiota ja lisäsi kovuutta enemmän kuin disakkaridien lisääminen (mm. laktoosi) maissipohjaisilla ekstrudaateilla.

Käytetyllä pohjaraaka-aineella näyttäisi myös olevan vaikutusta siihen, kuinka lisätty sokeri vaikuttaa ekstruusiossa. Carvalho ym. (2000) tutkivat sakkaroosin lisäämistä vehnä- ja maissipohjaisiin tuotteisiin ja totesivat, että sakkaroosin lisääminen suurissakaan pitoisuuksissa (20 %) ei vaikuttanut vehnäpohjaisen ekstrudaatin ekspansioon, mutta maissipohjaisen ekstrudaatin ekspansio sen sijaan pieneni merkittävästi. Yksi syy eriäville tuloksille saattoi olla sakkaroosin erilainen vaikutus maissin ja vehnän lasisiirtymälämpötilaan. Sokerin on todettu alentavan tärkkelyksen lasisiirtymälämpötilaa, mutta sen sijaan gluteeniin, jota vehnässä on runsaasti (70–75 % vehnän proteiinista on gluteenia), mutta maississa ei lainkaan, sokeri näyttäisi vaikuttavan päinvastaisesti kasvattaen sen lasisiirtymälämpötilaa (Kalichevsky ym. 1992; Kasarda 2013). Sokerin lisääminen kaurajauhoon saattaa näin ollen olla ongelmallista, sillä kaura ei sisällä gluteenia, jolloin sokerin negatiiviset vaikutukset saattavat olla merkittäviä. Toinen mahdollinen selitys Carvalhon saamille tuloksille liittyi maissi- ja vehnä jauheiden erilaisiin partikkelikokojakaumiin. Maissijauheen partikkelikokojakauma oli huomattavasti suurempi kuin vehnä jauheen, jolloin maissipartikkelit imivät mahdollisesti vettä itseensä hitaammin kuin pienemmät vehnäpartikkelit (Carvalho ym. 2000). Tämän seurauksena sokeri liukeni veteen, jolloin sokeriliuos toimi voiteluaineena vähentäen maissipartikkeleiden välistä kitkaa ja siten massan viskositeettiä.

Sokerin lisäämisestä on saatu myös toisenlaisia tuloksia, sillä Hsieh ym. (1990) totesivat, että sakkaroosin lisääminen (4–8 %) maissipohjaisiin ekstrusiotuotteisiin kasvatti ekspansiota ja pienensi tiheyttä ja kovuutta. Pienissä sokeripitoisuuksissa sokerit saattavat kilpailla vapaana olevasta vedestä ja helpottaa tärkkelyspolymeerien vuorovaikutusta, jonka lisäksi sokerit saattavat kasvattaa tärkkelyksen liisteröitymislämpötilaa ja estää

tärkkelyksen hajoamista, minkä seurauksena massan viskositeetti suurenee (D'Appolonia 1972; Hsieh ym. 1990). Kervinen (1981) totesi, että vehnäjäuhon tärkkelys saavutti suurimman liisteröitymisasteen, kun sokeripitoisuus oli 6 %, jonka jälkeen liisteröitymisaste pieneni sokeripitoisuuden lisääntyessä.

2.1.5 Ekstruusiotuotteiden päällystäminen

Elintarvikkeissa syötäviä päällysteitä on käytetty jo vuosisatoja, mutta vasta viime vuosikymmeninä niiden käyttö on kaupallistunut ja lisääntynyt huomattavasti (Pavlath ja Orts 2009). Päällystämistä voidaan käyttää moniin eri tarkoituksiin, kuten säätämään kosteus- ja kaasupitoisuutta, parantamaan ulkonäköä esimerkiksi tuomalla kiiltoa, estämään härskiintymistä, tuomaan makuaineita, parantamaan rakennetta tai ravitsemuksellista laatua, erottamaan sellaisia komponentteja toisistaan, joilla on eri veden aktiivisuus tai kuljettamaan funktionaalisia ainesosia (taulukko 2) (Baldwin ja Hagenmaier 2012). Elintarvikkeissa käytettävän syötävän päällysteen määritelmä on hyvin laaja, ja määritelmä voi vaihdella sen mukaan missä maassa päällyste tehdään, sillä lainsäädäntö päällysteiden suhteen ei ole yhtenäinen (Baldwin ja Hagenmaier 2012). Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että syötävällä päällysteellä tarkoitetaan elintarvikkeen pintaa peittävää suhteellisen ohutta materiaalia, jonka nauttiminen on turvallista eikä aiheuta kuluttajalle vaaraa (Pavlath ja Orts 2009).

Taulukko 2. Erilaisten syötävien päällysteiden käyttötarkoituksia ja -kohteita (Baldwin ja Hagenmaier 2012).

Hyöty	Päällystettävä elintarvike	Päällysteen pääraaka-aine
kosteuden ja hapen siirtymisen ehkäiseminen	pähkinä	zein
	rusina	heraproteiini
	jäädytetty kana	alginaatti
	kanafilee	kitosaani
	kananmuna	proteiini- ja kasviöljy
kosteuden siirtymisen vähentäminen	kakku	sokeri ja voi
	voileipäkeksi juustolla	kasviöljy
	makkara	kollageeni
	tuoreet hedelmät	sellakka, karnaubavaha
	paneroitu siipikarja	gellaanikumi
vähentynyt homeen kasvu	juusto	agar ja galaktomannaani
	savustettu kala	heraproteiini
	leipomotuotteet	fungisidejä sisältävä karrageeni
vähentynyt rasvan imeytyminen paiston yhteydessä	peruna	metyyliselluloosa
	donitsi	
parantunut ulkonäkö	tuoreet hedelmät	sellakka, karnaubavaha
	suklaamakeiset	zein
adheesion vähentyminen paistopinnalle	lasagne	juusto- tai lihakastike
	siipikarja	selluloosa ja proteiini

Viljapohjaisten ekstruusiotuotteiden päällystämässä voidaan käyttää monia eri raaka-aineita ja menetelmiä, jolloin saadaan parannettua tuotteen laatua ja säilyvyyttä (McHugh ja Avena-Bustillos 2012). Päällystämässä käytettäviä raaka-aineita ovat muun muassa polysakkaridit (tärkkelys- ja selluloosajohdannaiset, kitosaani, pektiini, karrageeni, alginaatti ja kumit), proteiinit (maissiproteiini, gluteeni, maapähkinäproteiini, soijaproteiini, kollageeni, gelatiini, munanvalkuaisproteiini, heraproteiini ja kaseiini), rasvat (mm. erilaiset vahat, kasviöljyt ja öljyhappo) ja hartsi, joko yksinään tai usein yhdessä käytettyinä (Baldwin ja Hagenmaier 2012). Polysakkaridit ja proteiinit ovat hydrofiilisiä, ja niillä on tyypillisesti hyvät kaasubARRIERIOMINAISUUDET mutta huonot barrieriominaisuudet kosteuden suhteen. Rasvat ovat läpäisevämpiä kaasujen suhteen, mutta niillä on paremmat barrieriominaisuudet kosteuden suhteen. Päällysteissä voi olla myös muita ainesosia (mm. pinta-aktiivisia aineita, pehmentimiä ja alkoholia), jotka usein parantavat mutta voivat myös heikentää päällysteen ominaisuuksia.

Viljapohjaiset ekstruusiotuotteet ovat hyvin huokoisia, jolloin ne imevät itseensä nopeasti ja herkästi vettä (Barroca 2014). Päällystämällä voidaan vähentää veden absorptiota ekstruusiotuotteisiin, jolloin niiden säilyvyyttä saadaan parannettua. Päällystämällä on myös mahdollista lisätä tuotteiden makeutta, jos päällystemateriaalina käytetään sokeria.

Tuotteiden päällystäminen voidaan toteuttaa useilla erilaisilla menetelmillä (McHugh ja Avena-Bustillos 2012). Joitakin jauhojen sekoituksessa ja kuivauksessa käytettyjä menetelmiä voidaan soveltaa myös päällystämiseen, kuten pyörörumpua, liuskasekoitinta tai leijupetiä (Ortega-Rivas 2005). Leijupedin soveltamisessa käytetään laajasti top-spray-menetelmää, jolloin päällystettävät partikkelit tuodaan suuttimen eteen, josta atomisoidut pisarat sumutetaan tasaisesti niiden päälle (Solis-Morales ym. 2009). Puffatuissa vehnätuotteissa käytetään tyypillisesti rumpupäällystämistä, jolloin päällystettävät partikkelit pyörivät lämmitetyssä rummussa ja päällystemateriaali voidaan joko kaataa tai suihkuttaa partikkelien päälle. Rumpupäällystämiseen liittyy kuitenkin ongelmia, sillä siinä partikkelit hankautuvat, jolloin päällystys voi olla epätasaista. Kaupallisesti päällystäminen toteutetaan usein kehittyneillä linjastoilla, joissa on yhdistettynä mineraalien ja vitamiinien lisäys ja päällystäminen (Barroca 2014).

Päällystämässä lämpötilaa ja sokerin määrää kuvaavaa Brix-tasoa voidaan säätää tarpeen mukaan, jolloin saadaan aikaiseksi toivottu ulkonäkö päällysteelle (Le Corre 2006). Ulkonäköä voidaan myös hienosäätää lisäämällä kuiva-aineita päällystämisen yhteydessä. Päällysteestä voidaan mitata erilaisia ominaisuuksia, jolloin pystytään arvioimaan päällysteen sopivuutta haluttuun tarkoitukseen (Baldwin ja Hagenmaier 2012). Mekaanisista ominaisuuksista tärkeitä ovat muun muassa paksuus, vetolujuus, venymä ja elastisuus, joita voidaan mitata venyttämällä, puhkaisemalla tai mittaamalla muodonmuutosta esimerkiksi Instronilla. Muita tärkeitä mitattavia ominaisuuksia on päällysteen kaasun- ja vedenläpäisevyysominaisuudet. Lisäksi voidaan tutkia päällysteen ulkonäköä, josta tärkeimpänä on kiillon määrä.

2.2 Maito- ja herajauheiden käyttö ekstruusiotuotteissa

2.2.1 Maito- ja herajauheet yleisesti

Maitojauheet ovat maidosta esimerkiksi sumutus- tai pakkaskuivaamalla valmistettuja enintään 5 % vettä sisältäviä jauheita (Smith 2008). Maitojauhetta voidaan valmistaa rasvattomasta maidosta (engl. skim milk powder, SMP), täysmaidosta (engl. whole milk powder, WMP) tai voinvalmistuksen sivutuotteena syntyvästä kirnumaidosta (engl. dry buttermilk, DBM). Maitojauheessa on kaikki maidon komponentit, paitsi vesi ja rasva, samassa suhteessa kuin maidossa. Maidon proteiineista noin 80 % on kaseiinia ja 20 % heraproteiineja. Maidosta voidaan valmistaa eri pitoisuuden proteiinia sisältäviä

maitoproteiinikonsentraatteja (engl. milk protein concentrate, MPC), jolloin laktoosia ja mineraaleja poistetaan maidosta ultrasuodatuksella. SMP:stä saadaan hapon avulla eristettyä veteen liukenematonta kaseiinia, joka voidaan emäksen avulla muuttaa vesiliukoiseksi kaseinaatiksi.

Hera on juuston valmistuksen yhteydessä syntyvä sivutuote, jota muodostuu jokaista juustokiloa kohti jopa 4 kg (Smith 2008). Juustomassasta saatua heraa kutsutaan makeaksi heraksi (engl. sweet whey, SW), mikäli valmistuksessa on käytetty ainoastaan juoksetetta. Hapon avulla saatua heraa kutsutaan happamaksi heraksi (engl. acid whey, AW). Makeasta tai happamasta herasta voidaan valmistaa hyvin vähärasvaista (noin 1 %), proteiinipitoista (noin 12 %) herajauhetta, jonka pääainesosa on laktoosi (noin 70 %). Herasta voidaan poistaa laktoosia ultrasuodatuksella, jolloin saadaan eri pitoisuuden proteiinia sisältäviä heraproteiinikonsentraatteja (engl. whey protein concentrate, WPC). Yli 90 % proteiineja sisältäviä heraproteiinijauheita kutsutaan heraproteiini-isolaateiksi (engl. whey protein isolate, WPI), ja niissä laktoosin ja rasvan pitoisuus on hyvin pieni (1–2 %). Heraproteiini koostuu suurimmaksi osin β -laktoglobuliinista (48–58 %), muita ainesosia ovat muun muassa α -laktalbumiini, glykomakropeptidi, immunoglobuliini ja naudan seerumin albumiini (Onwulata 2012). Maito- ja heraproteiinikonsentraateissa proteiinit eivät ole denaturoituneet, jolloin jauheiden liukoisuus on hyvin korkea (Smith 2008). Taulukossa 4 on esitetty erilaisia maito- ja herajauheita ja niiden ravintosisällöt.

Taulukko 4. Erilaisia maito- ja herajauheita ja niiden ravintosisällöt.

tuote	proteiini	laktoosi	Pitoisuus (%)			
			muut sokerit	rasva	vesi	tuhka
SMP ¹	35,0	53,0	0,0	0,6	-	7,8
Eila® Sweet SMP ¹	36,0	0,0	53,0	<1	-	8,0
34WPC ²	33,0	52,0	0,0	4,0	4,0	7,0
80WPC ²	77,0	9,0	0,0	6,0	4,0	4,0
WPI ²	89,0	2,0	0,0	1,0	5,0	3,0
SWS ²	12,5	73,0	0,0	1,0	5,0	8,5
Kaseinaatti ²	88,0	0,3	0,0	1,5	5,5	4,7

SMP = rasvaton maitojauhe, Eila Sweet SMP = laktoositon SMP, WPC = heraproteiinikonsentraatti, WPI = heraproteiini-isolaatti, SWS = makean heran kuiva-aine, ¹ Valio (2017), ² Smith (2008).

Maito- ja heraproteiinijauheissa voi olla ravintosisällön lisäksi eroja myös funktionaalisissa ominaisuuksissa, joita ovat mm. jauheen partikkelikoko ja -muoto, virtaus, vettyminen, vaahtoutuminen ja lämpöstabiilisuus (Sharma ym. 2012). Näihin ominaisuuksiin vaikuttaa muun muassa maidon koostumus ennen kuivausta (mm. ravintosisältö, viskositeetti ja lämpöherkkyys), käytetyt lisäaineet ja kuivausparametrit (mm. kuivaustornin ja suuttimen

malli sekä ilman termodynaamiset olosuhteet, kuten lämpötila ja suhteellinen kosteus). Rasvattomia maitojauheita tehdessä rasvaton maito voidaan lämpökäsitellä kolmella erilaisella tavalla: low-heat-, medium-heat- ja high-heat-lämpökäsittely (Sharma ym. 2012). Lämpökäsittelyn seurauksena liukoisen heraproteiinin määrä jauheessa muuttuu, mikä taas vaikuttaa jauheen funktionaalisiin ominaisuuksiin. Laktoosin vähentäminen tekee jauheen pinnasta tasaisemman ja parantaa jauheen virtausominaisuuksia vähentämällä paakkuntumisalttiutta. Muita maitojauheen tärkeitä ominaisuuksia ekstruusion kannalta ovat vesi- ja rasvapitoisuus ja hygroskooppisuus.

Jauheen partikkelikoolla voi olla merkittävä rooli ekstruusioprosessissa, jolloin samalla jauheella voidaan saada erilainen tuote riippuen sen partikkelikoosta (Onwulata ja Konstance 2006). Suurilla partikkeleilla on vähemmän kontaktipintaa ekstruuderin kammion kanssa, jolloin lämpötila vaikuttaa suuriin partikkeleihin vähemmän kuin pieniin partikkeleihin, ja tämän ilmiön on todettu vaikuttavan etenkin pienissä vesipitoisuuksissa (Guy 2001). Zhangin ja Hoseneyn (1998) mukaan pienemmät maissipartikkelit lämpenivät nopeammin, jolloin ne saavuttivat sulamislämmön aikaisemmin kuin suuremmat maissipartikkelit. Pienissä vesipitoisuuksissa SME:n on todettu olevan kääntäen verrannollinen partikkelikoon kanssa (Carvalho ym. 2010). Partikkelikoon kasvattamisen on todettu pienentävän ekstrudaattien ekspansiota maissijauheella (Garber ym. 1997; Zhang ja Hoseneyn 1998; Onwulata ja Konstance 2006). Toisaalta, Carvalho ym. (2010) totesivat, että partikkelikoon kasvattaminen maissijauheella kasvatti ekstrudaattien ekspansiota mutta pienensi SME:tä. Tutkimuksessa tosin lisättiin massan syöttönopeutta partikkelikoon kasvaessa, jolloin ekspansion kasvu saattoi olla seurausta syöttönopeuden lisäämisestä. Onwulata ja Konstance (2006) totesivat, että maissijauheen ja heraproteiinin (suhteessa 75:25) seoksella saatiin hyvälaatuisia ekstrudaatteja, kun partikkelikoko oli alle 300 µm.

2.2.2 Maitoproteiinit ekstruusiassa

Maitoproteiinit, erityisesti heraproteiinit, ovat potentiaalisia käyttökohteita erilaisissa välipalatuotteissa niiden tuoman ravitsemuksellisen lisäarvon vuoksi (Allen ym. 2007). Pienissä pitoisuuksissa maitoproteiinit (<5 %) voivat toimia myös funktionaalisina komponentteina parantaen ekstrudaattien rakennetta, mutta korkeammissa pitoisuuksissa (>10 %) vaikutus on usein kuitenkin päinvastainen (Singh ym. 1991; Onwulata ym. 1998).

Proteiinien ja tärkkelyksen yhteisvaikutuksella on merkittävä rooli tärkkelyksen liisteröitymiseen ja lopullisen tuotteen rakenteeseen (Kumar ym. 2016). Maitoproteiinien lisääminen tärkkelyspohjaisiin ekstruusiotuotteisiin mahdollistaa proteiini-tärkkelyskompleksin muodostumisen, ja muodostuneen kompleksin vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin vaihtelee olosuhteiden mukaan. Oikeassa suhteessa lisättynä maitoproteiinit voivat vahvistaa ekstruusiassa muodostuvaa tärkkelysgeeliä, mutta toisaalta proteiinit voivat myös heikentää tärkkelysgeeliä toimien muun muassa täyteaineena. Maitoproteiinin laadulla on myös merkitystä, sillä kaseiini ja heraproteiinit näyttäisivät reagoivan eri tavalla tärkkelyksen kanssa johtuen niiden erilaisista geeliytymisominaisuuksista. Onwulata ym. (2001) totesivat, että maitoproteiini-viljaseoksen vesipitoisuutta säätelemällä voi olla mahdollista minimoida maitoproteiinin aiheuttamia negatiivisia rakennemuutoksia. He totesivat lisäksi, että maitojauheiden sisältämä laktoosi saattaa heikentää ekstruusiotuotteiden rakennetta pienentämällä ekspansiota. Kaurajauhon ja maitoproteiinien yhteisvaikutusta ei tiettävästi ole tutkittu, mutta esimerkiksi Lobato ym. (2011) totesivat, että pelkällä rasvattoman soijajauhon ja kauraleseen yhdistelmällä oli mahdotonta saada aistinvaraisesti hyväksyttävä tuote. Sen sijaan maissitärkkelyksen lisäys (37,5 %) paransi tuotteen laatua huomattavasti.

Kuidun lisäämisen suurissa pitoisuuksissa (>36 %) on todettu heikentävän heraproteiinipohjaisten välipalatuotteiden fysikaalis-kemiallisia ominaisuuksia, mutta pienissä pitoisuuksissa (<10 %) kuitu voi parantaa näitä ominaisuuksia tai olla vaikutukseltaan neutraali (Onwulata ym. 2001; Walsh ja Wood 2010; Kirjoranta ym. 2012). Proteiinien negatiivisia vaikutuksia saattaa lisäksi olla mahdollista vähentää lisäämällä jauheseokseen muita komponentteja, sillä esimerkiksi Syed (2012) lisäsi kauraproteiineja sisältävään jauheseokseen amylopektiinistä koostuvaa vahamaista maissitärkkelystä, jolloin lopputuotteen kovuus väheni ja ekspansio kasvoi.

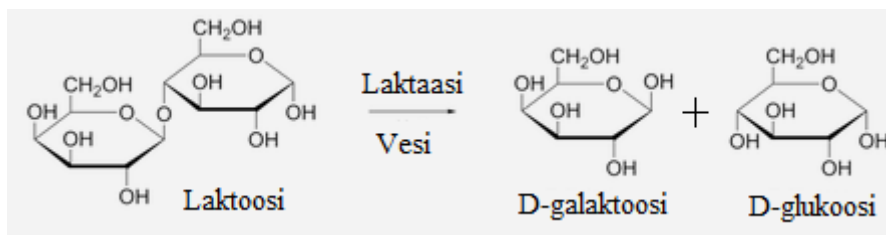
Kirjoranta ym. (2012) havaitsivat, että heraproteiini-isolaatin lisääminen (20 %) ohrapohjaiseen ekstruusiotuotteeseen lisäsi vääntömomenttia mutta ei painetta suuttimella ajon aikana, minkä lisäksi ekstrudaattien ekspansio kasvoi ja kovuus pieneni. Toisaalta, heraproteiinin lisäämisen suurissa pitoisuuksissa (25 ja 50 %) on todettu pienentävän ajon aikaista vääntömomenttia ja painetta sekä pienentävän ekstrudaattien ekspansiota ja lisäävän kovuutta (Onwulata ym. 2001). Matthey ja Hanna (1997) totesivat, että heraproteiinien lisääminen kasvatti maissipohjaisen ekstruusiomassan viskositeettiä, minkä seurauksena prosessin vääntömomentti kasvoi. Vääntömomentin kasvu ei kuitenkaan

tarkoittanut suurempaa ekspansiota, mikä olisi ollut odotettavissa, vaan vääntömomentin lisääntyessä ekspansio pieneni. Käytetyllä viljalla, proteiinin laadulla ja määrällä, massan vesipitoisuudella, prosessointiparametreilla ja muilla lisätyillä aineilla (mm. sokeri ja kuitu) näyttäisikin olevan merkittävä vaikutus siihen, miten lisätty proteiini käyttäytyy ekstruusion aikana ja minkälaiset ovat lopullisen tuotteen ominaisuudet (Singh ym. 1991; Onwulata ym. 1998; Onwulata ym. 2001; Allen ym. 2007; Walsh ym. 2010; Kirjoranta ym. 2012).

2.2.3 Maitojauheen sokerit

Maitojauheiden yleisin sokeri on laktoosi, ja maitojauheiden kuivauksen yhteydessä laktoosi muuttuu yleensä pääosin amorfiseksi, mutta myös kiteistä laktoosia voi olla pieniä määriä (Sharma ym. 2012). Amorfinen laktoosi on jauheessa jatkuvana faasina johon maidon muut komponentit, kuten proteiinit, rasvapisarat ja ilmakuplat ovat dispergoituneena. Amorfinen laktoosi on termodynaamisesti epävakaa ja hygroskooppinen, jolloin se adsorboi itseensä herkästi kosteutta ympäristöstään (Carpin ym. 2016). Maitojauheiden laktoosi ja muut sokerit voivat muuttaa muotoaan lasitilasta kumitilaan, kun jauhetta säilytetään korkeammassa lämpötilassa kuin mikä on sen lasisiirtymälämpötila. Amorfisen sokerin hygroskooppisuuden vuoksi veden absorboituminen maitojauheeseen voi laskea jauheen lasisiirtymälämpötilaa merkittävästi. Maitojauheen säilyttäminen lasisiirtymälämpötilan yläpuolella johtaa lopulta amorfisen sokerin kiteytymiseen, jonka seurauksena maitojauhe paakkuuntuu (Foster 2002).

Laktoosi on disakkaridi, joka hajoaa laktaasientsyymin vaikutuksesta kahdeksi monosakkariksi, glukoosiksi ja galaktoosiksi (kuva 3) (Morrissey 1985). Laktoosi ei ole kovin makea sokeri, ja esimerkiksi Moskowitz (1970) tutki 15:n eri sokerin makeuksia toteaten, että sokereista laktoosi ja raffiinoosi olivat vähiten makeita, kun taas makeimpia olivat sakkaroosi ja fruktoosi, glukoosin ja galaktoosin sijoittuessa sijoille 4. ja 6. Sokerien makeuksille voidaan antaa lukuarvo, jolloin suhteelliseksi makeuksiksi on saatu glukoosille 0,7; galaktoosille 0,3 ja laktoosille 0,2 (sakkaroosi = 1) (Nutrientsreview 2016). Näin ollen saattaa olla mahdollista, että maitojauheen, jossa laktoosi on hydrolysoitu glukoosiksi ja galaktoosiksi, käyttämisellä voidaan saavuttaa suurempi makeus kuin laktoosia sisältävällä maitojauheella, vaikka käytettävät maitojauhepitoisuudet olisivatkin samat.



Kuva 3. Laktoosin hydrolysoituminen galaktoosiksi ja glukoosiksi laktaasientsyymin ja veden avulla (Samuel. 2012).

Laktoosi, glukoosi ja galaktoosi ovat kaikki pelkistäviä sokereita, jolloin ne voivat reagoida aminohappojen kanssa aiheuttaen Maillard-reaktion ekstruusion aikana (Tester ja Karkalas 2003; Singh ym. 2007; Seigle ja Nash 2012). Maillard-reaktion viimeisessä vaiheessa voi muodostua melanoideja, jotka aiheuttavat reaktiolle tyypillisen ruskean värin (Brands ja van Boekel 2001). Maillard-reaktiossa muodostuneen värin määrä riippuu käytetystä sokerista, ja monosakkaridien (mm. glukoosi ja galaktoosi) on todettu muodostavan enemmän väriä kuin disakkaridien (mm. laktoosi) (Ames 1990). Aminohapon koostumuksella on myös vaikutusta värinmuodostukseen. Lysiinin, jota on runsaasti maitoproteiineissa, on todettu muodostavan aminohapoista eniten väriä Maillard-reaktiossa. Guerrero ym. (2012) totesivat, että ekstruusiassa Maillard-reaktiota edistää suuttimen korkea lämpötila ja massan matala vesipitoisuus.

Hiilihydraattien lasisiirtymälämpötila (T_g) on kääntäen verrannollinen niiden molekyylipainoon, jolloin laktoosilla on korkea T_g (97–116 °C) verrattuna glukoosiin (30 °C) ja galaktoosiin (31 °C) (Roos ja Karel 1991; Roos 1993;). Rasvattomalla maitojauheella, jossa laktoosi on hydrolysoitu, onkin todettu olevan huomattavasti pienempi T_g kuin laktoosia sisältävällä rasvattomalla maitojauheella (Jouppila ja Roos 1994). Fernandez ym. (2003) tutkivat erilaisten pakkaskuivattujen maitojauheiden lasisiirtymälämpötiloja (11 % RH:ssa), ja heidän mukaansa täysmaidon T_g oli 61 °C, rasvattoman maidon 62 °C ja laktoosittoman täysmaidon 36 °C. Rasvattoman laktoosittoman maitojauheen pienestä T_g :stä johtuen jo pienikin lisäys vesipitoisuudessa voi johtaa T_g :n alenemiseen alle huoneenlämmön (Shrestha ym. 2007). Korkeissa säilytyslämpötiloissa sokereiden on todettu reagoivan maitoproteiinien kanssa aiheuttaen ei-entsymaattista ruskistumista, joka on seurausta Maillard-reaktiosta (Fernandez ym. 2003).

Maidon sokereiden vaikutusta ekstruusiassa ei tiettävästi ole tutkittu, mutta Onwulata ym. (2001) totesivat, että WPC:n laktoosilla saattoi olla negatiivista vaikutusta ekstrudaattien

ekspansioon, sillä sokeripitoisuuden lisääntymisen on todettu pienentävän ekstrudaattien ekspansiota (Jin ym. 1994; Fan ym. 1996). Näin ollen esimerkiksi lähes laktoositon WPI saattaisi olla parempi vaihtoehto ekstruusiossa kuin laktoosia sisältävä WPC. Maitojauheen, jossa laktoosi on hydrolysoitu, käytöstä ekstruusiossa ei myöskään tiettävästi ole tehty tutkimuksia, joten ei ole tiedossa kuinka laktoosia sisältävä maitojauhe eroaa maitojauheesta, jossa laktoosi on hydrolysoitu.

2.3 Ekstruusioprosessin ja -tuotteiden tutkiminen

2.3.1 Objektiiviset menetelmät

Ekstruusiotuotteita valmistavat yritykset käyttävät monia keinoja arvioidakseen raaka-aineiden sopivuutta, ekstruusion prosessiolosuhteita ja ekstrudaattien ominaisuuksia (Yağci ja Gögüs 2012). Objektiivisilla menetelmillä saadaan tietoa ilman, että ihmisen mieltymykset vaikuttavat tuloksiin. Nämä menetelmät perustuvat standardoituihin testeihin, jotka voivat olla luonteeltaan fysikaalisia, kemiallisia tai instrumentaalisia.

Ekspansio on yksi tärkeimmistä ekstrudaattien fysikaalisista ominaisuuksista, ja se kertoo näytteen puffautuvuudesta sen tullessa ulos ekstruderista (Yağci ja Gögüs 2012). Puffautuvuudella tarkoitetaan massan laajenemista sen tullessa ulos suuttimesta. Ekspansioon vaikuttaa hyvin voimakkaasti massan vesipitoisuus, ja pienissä vesipitoisuuksissa ekspansio usein kasvaa. Ekspansion on myös todettu korreloivan muiden ominaisuuksien, kuten kovuuden kanssa (Allen ym. 2007). Ekspansiota voidaan arvioida joko pitkittäisesti (engl. longitudinal expansion index, LEI) tai säteen suuntaisesti (engl. sectional expansion index, SEI), joista jälkimmäinen on yleisemmin käytetty (Yağci ja Gögüs 2012). SEI ja LEI ovat usein kääntäen verrannollisia keskenään. SEI saadaan laskettua ekstrudaatin halkaisijan ja suuttimen halkaisijan suhteesta. Ekspansion lisäksi tärkeitä ominaisuuksia on bulkkitiheys (engl. bulk density) ja huokoisuus (Yağci ja Gögüs 2012). Bulkkitiheys saadaan laskettua massan ja tilavuuden avulla, jolloin yksiköksi tulee g/cm^3 . Bulkkitiheys voidaan laskea esimerkiksi täyttämällä tilavuudeltaan tunnettu lasiastia ekstrudaateilla, ja punnitsemalla tämä astia. Täten bulkkitiheyteen vaikuttaa ekstrudaattien geometria, joka määrittelee sen, miten ekstrudaatit asettuvat toistensa suhteen. Yksittäisen ekstrudaatin tiheys voidaan laskea, jos punnitaan ekstrudaatti ja mitataan tai arvioidaan sen tilavuus. Usein on kuitenkin hankala mitata ekstrudaatin tilavuutta, joten monesti bulkkitiheyden käyttäminen saattaa olla perusteltua. Huokoisuus kertoo ekstrudaatin

ilmakuplien määrästä ja koosta, ja se voidaan määrittää bulkkitylavyuden (bulkkitylavyus = $1/\rho_b$, missä ρ_b = bulkkityheys) ja tylavyuden (tylavyus = $1/\rho_s$, missä ρ_s = tyheys) avulla.

Ekstrudaattien ulkonäöstä väri on tärkeä arvioitava ominaisuus, sillä sen avulla saadaan tietoa muun muassa Maillard-reaktion ja karamellisaation voimakkuuksista, joiden avulla taas voidaan arvioida kemiallisten reaktioiden voimakkuutta (Yağci ja Göğüs 2012). Väriä voidaan arvioida esimerkiksi värimittarin avulla.

Ekstrudaattien tekstuuri on yksi tärkeimmistä kriteereistä, joita kuluttajat käyttävät arvioidakseen tuotteen laatua (Yağci ja Göğüs 2012). Ekstrudaattien tekstuuria voidaan arvioida erilaisilla instrumentaalisilla menetelmillä, jotka mittaavat voimaa tai muodonmuutosta. Ekstrudaattien muodonmuutosta mitattaessa voidaan arvioida mm. kovuutta, rapeutta, jäykkyyttä ja elastisuutta. Kovuutta voidaan arvioida esimerkiksi aineenkoestuslaitteella (esim. Instron) käyttäen mekaanisten ominaisuuksien mittaamiseen tarkoitettua kolmipistetaivutusta. Kolmipistetaivutuksella voidaan mallintaa ekstrudaattien purutuntumaa tilanteissa, joissa kuluttaja puraisee tuotetta. Ekstrudaateista voidaan myös mitata äänenvoimakkuutta ja -korkeutta, kun niihin kohdistetaan voimaa, jolloin saadaan tietoa muun muassa tuotteen rapeudesta (Yağci ja Göğüs 2012).

Jauheiden vedensidontakykyä (engl. water absorption index, WAI) ja liukoisuutta veteen (engl. water solubility index, WSI) hyödynnetään ekstrudaattien arvioinnissa, ja niiden avulla saadaan muun muassa tietoa siitä, kuinka ekstruusiotuote saattaa käyttäytyä, kun sitä prosessoidaan edelleen (Yağci ja Göğüs 2012). WAI voidaan määrittää mittaamalla tärkkelyksen syrjäyttämän tylavyuden määrän, kun tärkkelyksen annetaan turvota vedessä. WSI voidaan määrittää laskemalla takaisin saadun kuiva-aineen määrä prosentteina, kun supernatantti on höyrystetty veden adsorptiomäärityksessä. WSI:n avulla voidaan arvioida makromolekyylien hajoamista ja tärkkelyksen konvertoitumisastetta ekstruusion aikana, sillä tärkkelyksen hajoamisen seurauksena liukoisen materiaalin määrä kasvaa, jolloin myös WSI kasvaa (Kirby ym. 1988; Yağci ja Göğüs 2012).

Tärkkelys on ekstrudaattien pääraaka-aine, ja tärkkelyksen rakenteellisilla muutoksilla, kuten liisteröitymisellä, sulamisella ja pilkkoutumisella on merkittävä vaikutus ekstruusioprosessin kannalta (Yağci ja Göğüs 2012). Näin ollen tärkkelyksen rakenteelliset muutokset vaikuttavat suoraan monien ekstruusiotuotteiden fysikaalis-kemiallisiin ominaisuuksiin. Ekstruusion aikana tärkkelys hydratoituu osittain ja siihen kohdistuu

kasvava leikkausjännitys, kun se kulkeutuu ja lämpenee kammiossa. Pienissä vesipitoisuuksissa ekstruusiassa esiintyy liisteröityneitä, sulaneita ja pilkkoutuneita tärkkelysjyväsiä samanaikaisesti. Ekstrudaattien tärkkelysosan kypsyyttä ja liisteröitymistä voidaan arvioida tutkimalla ekstrudaatteja useilla eri menetelmillä. Menetelmät voivat perustua liukoisuus- ja liisteröitymisominaisuuksien, entsyymiherkkyyden, morfologisten piirteiden ja liisteröitymisasteen tutkimiseen.

Tärkkelyspohjaisten ekstrudaattien liisteröitymisominaisuuksia voidaan tutkia viskosimetrillä, joista yleisesti käytettyjä ovat amylografi ja RVA (rapid visco analyzer), mittaamalla yhtäjaksoisesti nestemäisen näytteen viskositeettiä, kun näytettä lämmitetään ja jäähdytetään hallitusti (Yağci ja Göğüs 2012). Viskositeetin muutokset selittävät usein, kuinka uudet prosessit vaikuttavat tärkkelyksen ominaisuuksiin. Saadusta liisteröitymiskäyrästä, jossa viskositeetti on esitetty ajan funktiona, voidaan arvioida useita muuttujia, kuten liisteröitymislämpötilaa ja -viskositeettia, maksimiviskositeettia, kylmä- ja kuumaliisteröitymisviskositeettia ja kypsymisaikaa. Differentiaalisella pyyhkäisykalorimetrillä (engl. differential scanning calorimetry, DSC) voidaan tutkia tärkkelyksen liisteröitymistä jauheseoksessa ja ekstrudaateissa. Ekstrudaattien lasisiirtymälämpötilan mittaamisella saadaan tietoa reseptin ja lisäksi prosessointi- ja säilytysolosuhteiden vaikutuksista ekstrudaatin rakenteeseen. Ekstrudaattien rakennetta voidaan tutkia myös röntgendiffraktometrin (engl. X-ray diffractometer, XRD) ja erilaisten mikroskooppien, kuten pyyhkäisyelektronimikroskoopin (engl. scanning electron microscope, SEM) ja valomikroskoopin (engl. light microscope, LM) avulla, jolloin saadaan tietoa ekstrudaattien morfologiasta.

2.3.2 Subjektiiviset menetelmät

Subjektiivisissa menetelmissä ekstruusiotuotteiden ominaisuuksia ja laatua arvioi ihminen tai useat ihmiset, ja usein apuna käytetään aistinvaraista arviointia (Yağci ja Göğüs 2012). Subjektiivisissa menetelmissä saatuihin tuloksiin vaikuttaa arvioijien harjaantuneisuus, omat mieltymykset ja aistien voimakkuudet.

Aistinvaraisessa arvioinnissa tuotetta arvioi useista ihmisistä koostuva raati (Tuorila ja Appleby 2008). Raati voi olla kouluttamaton kuluttajaraati, asiantuntijaraati tai koulutettu raati. Kuluttajaraati koostuu useista kymmenistä, jopa sadoista arvioijista, ja sitä käytetään, kun halutaan selvittää esimerkiksi, mikä merkitys havaituilla ominaisuuksilla on tuotteen

hyväksyttävyyteen kuluttajien keskuudessa. Koulutettu raati koostuu pienestä ryhmästä ihmisiä, ja sitä voidaan käyttää arvioimaan ominaisuuksien eroavaisuuksia, kuten erilaisten ekstrudaattien paksuutta, kovuutta tai makeutta. Koulutettu raati perehtyy tutkittavaan tuotteeseen etukäteen ja päättää yhdessä muun muassa, mitä tutkitaan (terminologia) ja minkälaista asteikkoa käytetään. Koulutettu raati pyrkii arvioimaan arvioitavia ominaisuuksia mahdollisimman objektiivisesti, jolloin arvioijat toimivat ikään kuin mittalaitteina. Aistinvaraisessa arvioinnissa voidaan käyttää erilaisia laboratoriomenetelmiä, ja yksi yleisesti käytetty on kuvailevat menetelmät (Roininen ym. 2008). Kuvailevia menetelmiä on useita ja, ne voivat olla kvalitatiivisia, kvantitatiivisia tai useimmissa tapauksissa näiden yhdistelmiä, jolloin näytteen kuvailuun kehitetään sanasto, joka ankkuroidaan luotuun arviointiasteikkoon (esim. 1 = ei lainkaan makea; 9 = erittäin makea). Kuvailevia menetelmiä käytetään pääsääntöisesti tuotekehityksen ja laadunvalvonnan apuna, kun halutaan esimerkiksi selvittää, kuinka sokerin lisääminen tietyssä pitoisuudessa vaikuttaa ekstrudaatin ominaisuuksiin, kuten kovuuteen ja makeuteen.

Kuluttajien vaatimukset perustuvat pohjimmiltaan ekstruusiotuotteiden aistinvaraisiin ominaisuuksiin (Yağci ja Göğüs 2012). Ekstrudaateista voidaan arvioida esimerkiksi ulkonäköä, väriä, makua ja hajua, rakennetta ja suutuntumaa. Ekstruusiotuotteiden maku ja haju on usein mieto, sillä prosessin ollessa nopea maku- ja hajuyhdisteitä ei ehdi muodostumaan suuria määriä. Tästä syystä aromeita lisätään usein ekstruusion jälkeen, jotta tuotteesta saadaan hyväksyttävämpi. Monet ekstruusiotuotteet, kuten aamiaismurot, päällystetään, jolloin saadaan maun lisäksi myös tuotteen rakennetta parannettua. Välipalatuotteiden tärkein aistinvaraisesti arvioitu rakenteellinen ominaisuus on rapeus, ja rapeuden ollessa vähäistä tuote koetaan usein huonolaatuiseksi. Rapeuden arviointi perustuu kosketukseen (käsillä), kinetiikkaan (lihasten jännittyminen ja liike) ja kuulo- ja näköhavaintoihin. Ekstruusiiossa prosessin lämpötilan ja massan vesipitoisuuden on todettu vaikuttavan merkittävästi ekstrudaattien rapeuteen (Chen ym. 1991; Sauvaget ja Blond 1991).

Ekstruusiotuotteet valmistetaan usein tietyn muotoisiksi ja kokoisiksi riippuen siitä, millaiset ovat markkinoiden vaatimukset, ja usein muoto ja koko ovat ainoat muutokset, joita ekstruusiotuotteeseen tehdään (Yağci ja Göğüs 2012). Ekstrudaattien muoto ja koko ovat pääosin riippuvaisia suuttimen muodosta, ekstrudaattien leikkaussysteemistä ja ekspansiosta. Ekstrudaattien laadun ylläpitämiseksi riittää usein tuotteen silmämääräinen

arvioiminen, jolloin prosessointiparametrejä voidaan muuttaa tarvittaessa nopeasti, ilman että prosessia tarvitsee pysäyttää. Tuotteesta arvioidaan usein yhdenmukaisuutta, rikkinäisten tuotteiden määrää ja ilmakuplien määrää ja kokoa, ja arvioija voi käyttää apuna vertailunäytettä tai kuvaa, johon hän vertaa arvioitavia tuotteita.

2.3.3 Tulosten analysointi ja koeasetelman valinta

Ekstruusioprosessista ja -tuotteista saatuja mittaustuloksia voidaan analysoida erilaisilla tilastollisilla menetelmillä. Tilastotiede on tieteenala, joka kerää, organisoi ja analysoi dataa sekä tekee päätelmiä, kuinka otoksesta saatuja tuloksia voidaan soveltaa koko perusjoukkoon (Winters ym. 2010). Oikeiden johtopäätösten tekemiseksi on kokeet suunniteltava ja analysoitavat näytteet valittava asianmukaisesti sekä tulosten analysoimiseen valittava oikeanlainen tilastollinen testi. Vääränlaisen testin valinnalla voidaan päätyä väärin johtopäätöksiin tulosten suhteen. Testin valintaan vaikuttaa muun muassa tutkimuksen laatu (kvalitatiivinen vai kvantitatiivinen), otoskoko, otosten riippumattomuus, muuttujien jakautuneisuus (normaalijakautunut vai ei-normaalijakaunut) ja selittävien eli riippumattomien muuttujien (esim. massan vesipitoisuus, ruuvien pyörimisnopeus tai kammion lämpötila) lukumäärä (Nayak ja Hazra 2019). Normaalisti jakautuneessa datassa ryhmien keskihajonnat ovat normaalisti jakautuneet ja näytteiden ja populaation varianssit ovat yhtä suuret, jolloin käytetään parametrisiä testejä (Ali ja Bhaskar 2016). Jos data on vinoutunut tai datan jakauma ei ole tiedossa, niin data on ei-normaalisti jakautunut, jolloin käytetään ei-parametrisiä testejä. Dataa voidaan analysoida erilaisilla testeillä, kuten t-testillä, khiin neliö -testillä tai regressio- ja varianssianalyysillä. Datan analysoimiseen on käytössä useita tietokoneohjelmia, kuten SPSS, R, Matlab ja MS Excel.

Varianssianalyysi on menetelmä, jolla tutkitaan, eroavatko kahden tai useamman ryhmän keskiarvot toisistaan (esim. eroavatko kolmen eri valmistajan ekstruusiotuotteen makeudet toisistaan) (Trajkovski 2016). Varianssianalyysi tutkii siis, ovatko selitettävien muuttujien eli vastemuuttujien (esim. makeus tai vuositulot) keskiarvot erisuuruisia selittävän muuttujan luokissa (esim. ekstruusiotuote tai sukupuoli). Yksisuuntaista varianssianalyysiä käytetään, kun selittäviä muuttujia on yksi, kun taas kahden selittävän muuttujan tapauksessa käytetään kaksisuuntaista varianssianalyysiä, jolloin voidaan tutkia, vaikuttavatko molemmat selittävät muuttujat vastemuuttujiin yksittäin ja onko niillä yhteisvaikutuksia (FSD 2002a). Varianssianalyysissä vastemuuttujan varianssi on jaettu

kahteen osaan, jolloin toinen osa mittaa ryhmien välistä vaihtelua ja toinen osa ryhmien sisäistä vaihtelua. Mitä suurempi on ryhmien välinen vaihtelu verrattuna ryhmien sisäiseen vaihteluun, sitä merkitsevämpiä eroja ryhmien välillä on. Varianssianalyysissä nollahypoteesinä on, että tutkittavan kohteen keskiarvot ovat yhtä suuret. Vastemuuttujien keskiarvojen välillä on siis eroja, mikäli nollahypoteesi hylätään. Tilastollisena testinä käytetään F-testiä, joka kertoo, millä todennäköisyydellä nollahypoteesi hylätään. Hypoteesi hylätään yleensä, kun F-testin p-arvo on alle 0,05.

Regressioanalyysi on yksi joustavimmista ja eniten käytetyistä kvantitatiivisista analyyseistä (Hardy 2011). Regressioanalyysillä tutkitaan yhden tai useamman selittävän muuttujan vaikutusta vastemuuttujiin (esim. vaikuttaako ekstruusioprosessin lämpötila tai massan vesipitoisuus lopputuotteen ekspansioon tai kovuuteen). Regressiomalleja on olemassa useita erilaisia riippuen muun muassa regressiomallin funktionaalisesta muodosta (lineaarinen tai epälineaarinen regressiomalli) ja yhtälöiden lukumäärästä (yhden yhtälön regressiomalli tai moniyhtälömallit). Usean muuttujan lineaarisessa regressiomallissa (engl. multiple linear regression, MLR) selittävien muuttujien avulla pyritään luomaan lineaarinen suhde vastemuuttujan välille. MLR-mallille voidaan muodostaa yhtälö, jolloin esimerkiksi kahden selittävän muuttujan yhtälö on muotoa $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$. Yhtälössä y on vastemuuttuja, β_0 on vakiotermi ja x_1 ja x_2 ovat selittävät muuttujat ja β_1 ja β_2 niiden regressiokertoimet. Regressiokertoimien suuruus ja merkki (positiivinen tai negatiivinen) kertovat, kuinka paljon ja mihin suuntaan selittävät muuttujat vaikuttavat vastemuuttujan suhteen. Regressioanalyysissä F-testi kertoo, ovatko selittävät muuttujat merkitseviä eli pystyvätkö ne ylipäänsä selittämään vastemuuttujien vaihtelua (FSD 2002b).

Regressioanalyysissä sellaisten muuttujien, jotka eivät saa lukuarvoja (esim. maitojauhetyyppi), vaikutusta vastemuuttujiin (esim. ekstrudaattien ekspansioon) voidaan tutkia koodaamalla muuttujat nollaksi tai yhdeksi, jolloin niitä kutsutaan dummy-muuttujiksi (FSD 2002b). Dummy-muuttuja sisällytetään regressiomallin yhtälöön, jolloin yhtälö voi olla esimerkiksi muotoa $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$. Näin ollen x_3 on dummy-muuttuja, ja sille annetaan arvoksi joko 0 tai 1 (esim. arvo 0 on rasvaton maitojauhe ja arvo 1 on täysrasvainen maitojauhe). Tuloksia tulkitaan siten, että dummy-muuttujan regressiokerroin (β_3) ilmaisee, kuinka paljon muuttujalla arvon yksi ryhmä eroaa ryhmistä, jotka saavat arvon nolla. Kertoimen ollessa positiivinen regressiokerroin kertoo esimerkiksi, kuinka paljon suurempi ekspansio rasvatonta maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla on verrattuna täysrasvaista maitojauhetta sisältäviin ekstrudaatteihin, ja

negatiivinen luku taas kertoo, kuinka paljon pienempi ekspansio on. Dummy-muuttujia voidaan myös käyttää tilanteissa, joissa muuttuja sisältää useamman kuin kaksi vaihtoehtoa (esim. kolme erilaista maitojauhetta). Tilanteissa, joissa muuttuja saa useamman kuin kaksi vaihtoehtoa tulee dummy-muuttujia luoda yksi vähemmän kuin muuttujassa on vaihtoehtoja (esim. kolmen maitojauheen tapauksessa luodaan kaksi dummy-muuttujaa).

F-testin lisäksi tilastollisissa menetelmissä käytetään myös muita testejä, jotka kertovat mallin selitysvoimasta (FSD 2002b). Yksi tärkeimmistä testeistä on selitysaste (R^2), joka kertoo, kuinka suuren osuuden selittävät muuttujat pystyvät selittämään vastemuuttujien vaihtelusta (esim. kuinka suuren osuuden ekstruusion lämpötila selittää lopputuotteen ekspansiosta). R^2 saadaan laskemalla vastemuuttujan arvojen ja mallin tuottamien ennustearvojen korrelaation neliö, ja sen arvo vaihtelee nollan ja yhden välillä. Suurempi R^2 -luku kertoo paremmasta selitysasteesta. Korjattua R^2 :ta (engl. adjusted R^2) käytetään, kun selittäviä muuttujia on enemmän kuin yksi, ja se on arvoltaan aina pienempi tai yhtä suuri kuin varsinainen R^2 -luku. Mallille voidaan myös antaa ennustusselitysaste Q^2 , joka kuvaa, kuinka hyvin mallin avulla voidaan ennustaa. Ennustusselitysaste on aina pienempi kuin selitysaste.

Tilastollisen menetelmän valinnassa on tärkeää ottaa huomioon, kuinka kokeet on toteutettu (Kowalski ja Potcner 2003). Kuvitellaan esimerkiksi koetilanne, jossa käytetään kolmea muuttujaa kahdella eri tasolla, jolloin puhutaan 2^3 -koeasetelmasta. Tällaisessa tapauksessa kokeet suoritettaisiin usein täydellisellä faktorikokeella (engl. full factorial), jolloin mahdollisia kokeita olisi yhteensä kahdeksan ja ne suoritettaisiin täysin satunnaisessa järjestyksessä. Usein kokeiden täysi satunnaistaminen on kuitenkin hankala toteuttaa esimerkiksi aikatauluun, kustannuksiin tai materiaaliin liittyvien rajoitteiden takia. Tilanteissa, joissa täysi satunnaistaminen ei ole käytännön syistä mahdollista, voidaan käyttää apuna alunperin maataloustieteellisuuteen kehitettyä lohkotukseen perustuvaa split-plot-menetelmää (Kowalski ja Potcner 2003). Split-plot-menetelmää käytetään esimerkiksi silloin, kun kaikkien tekijöiden tasoja ei ole satunnaisesti määritetty tai nollattu jokaista koetta varten, tai kun mahdollisten yhdistelmien satunnaistamisessa on rajoituksia (esim. aika- tai materiaalirajoituksia). Menetelmässä määritetään tekijät, jotka ovat vaikeasti muutettavia (engl. hard-to-change, HTC) ja helposti muutettavia (engl. easy-to-change, ETC). Kuvitellaan esimerkiksi tilanne, jossa halutaan tutkia massan tärkkelyspitoisuuden ja ruuvien pyörimisnopeuden vaikutusta kolmella eri tasolla lopputuotteen ekspansioon. Massan tärkkelyspitoisuus olisi tällöin HTC, sillä

tärkkelyspitoisuuden muuttamista varten reseptiä olisi muutettava. Jokaisen reseptin muutoksen yhteydessä ekstruuderin olisi mahdollisesti aina puhdistettava, mikä taas veisi huomattavan paljon aikaa. Ruuvien pyörimisnopeutta voidaan sitä vastoin helposti säätää prosessin aikana, joten se olisi ETC. Täysin satunnaistettu koesuunnitelma vaatisi tässä tapauksessa yhdeksän eri ajokertaa (3^2), koska ekstruuderin puhdistettaisiin jokaisen reseptimuutoksen yhteydessä. Resurssien säästämiseksi ajokerrat voidaan kuitenkin lohkottaa massan tärkkelyspitoisuuden mukaan, jolloin ajokerta olisi ns. päälohko (engl. whole plot, WP) ja pyörimisnopeus sen alalohko (engl. subplot, SP). WP voitaisiin jakaa kolmeen lohkoon (kolme ajokertaa), jolloin yhden lohkon massan tärkkelyspitoisuudella testattaisiin kaikki pyörimisnopeudet satunnaisessa järjestyksessä sen sijaan, että jokaisella tärkkelyspitoisuudella testattaisiin jokainen pyörimisnopeus (taulukko 3). Split-plot-menetelmä saattaa monissa tapauksissa olla vartenotettava vaihtoehto, ja Jones ja Nachtsheim (2009) väittääkin, että split-plot-menetelmä on monesti parempi vaihtoehto kustannusten, tehokkuuden ja validiteetin osalta kuin täysin satunnaistettu menetelmä.

Taulukko 3. Esimerkki split-plot-koeasetelmasta, jossa massan tärkkelyspitoisuus on HTC (hard-to-change factor) ja ruuvien pyörimisnopeus ETC (easy-to-change factor). WP = whole plot (päälohko).

WP (ajokerta)	Massan tärkkelyspitoisuus (%)	Ruuvien pyörimisnopeus (rpm)
1	64	300
	64	500
	64	400
2	60	500
	60	300
	60	400
	68	500
3	68	400
	68	300

3 KOKEELLINEN TUTKIMUS

3.1 Materiaalit ja menetelmät

3.1.1 Materiaalit

Työssä käytettävät kuiva-aineet olivat korkean tärkkelyspitoisuuden kaurajauho (Fazer Mills, Lahti, Suomi), vahamainen maissitärkkelys (Maize Waxy Starch N-200; Roquette, Cassano Spinola AL, Italia) ja kolme rasvatonta maitojauhetta (Eila® SMP, Eila® Sweet SMP ja SMP; Valio Oy, Helsinki, Suomi). Lisäksi yhdessä esikokeessa käytettiin maissiryyniä (Polenta; Risenta, Sollentuna, Ruotsi). Jatkossa maitojauheista puhuttaessa käytetään seuraavia lyhenteitä: Eila® SMP = ESMP, Eila Sweet® SMP = ESSMP ja SMP = SMP. Taulukossa 5 on esitetty kuiva-aineiden ravintosisällöt ja mitatut vesipitoisuudet. Maitojauheista ESSMP:llä ja SMP:llä oli lähes sama ravintosisältö, mutta Eila-maitojauheessa laktoosi oli hydrolysoitu glukoosiksi ja galaktoosiksi. ESMP-maitojauheessa proteiinipitoisuus oli suurempi ja sokeripitoisuus pienempi kuin muissa maitojauheissa.

Taulukko 5. Tutkimuksessa käytetyt jauheet ja niiden ravintosisällöt ja vesipitoisuudet.

jauhe	Pitoisuus (%)						
	proteiini	tärkkelys	laktoosi	muut sokerit	kuitu	rasva	vesi, mitattu
SMP	35,0	0	53,0	0	0	0,6	3,6
Eila® SMP	47	0	0	40	0	1	1,5
Eila® Sweet SMP	36,0	0	0	53,0	0	<1	2,0
Vahamainen maissitärkkelys	0	88	0	0	0	0	11,5
Polenta	8	72	0	1	5	1	13,4

3.1.2 Esikokeet

Ennen varsinaisia kokeita suoritettiin kolme esikoetta, joilla pyrittiin löytämään sopiva resepti perusmassalle, jonka lisäksi selvitettiin optimaaliset massan vesipitoisuudet ja prosessointiparametrivakioiden (ruuvien pyörimisnopeus, syöttönopeus ja lämpötilaprofiili) arvot. Testattavat massan vesipitoisuudet olivat 14, 16, 18 ja 20 %, ruuvien pyörimisnopeudet 300, 400 ja 500 rpm ja jauheen ja veden syöttönopeudet 68, 76 ja 84 g/min. Lämpötilaprofiilia muutettiin kokeiden edetessä tietokoneella. Kokeet tehtiin kaksiruuviekstruuderilla (Thermo Prism PTW24; Thermo Haake PolyLab System, Dreieich, Saksa), jossa ruuvit pyörivät samaan suuntaan. Ruuvien pituus oli 672 mm ja halkaisija

24 mm. Suuttimen halkaisija oli 5 mm. Kaikissa esikokeissa perusmassaan lisättiin ESMP-maitojauhetta siten, että massan maitoproteiinipitoisuus oli 10 % (kuiva-aineesta). Esikokeita tehtiin, kunnes saatiin tarpeeksi laadukas ekstrudaatti (arviointi silmämääräisesti), jotta varsinaiset kokeet voitiin aloittaa. Ensimmäisessä esikokeessa perusmassana käytettiin kaurajauhoa, toisessa esikokeessa kaurajauhon/polentan seosta (70/30 % kuiva-aineesta) ja kolmannessa esikokeessa kaurajauhon/vahamaisen maissitärkkelyksen seosta (70/30 % kuiva-aineesta) (kuva 4).



Kuva 4. Esikokeissa valmistettuja ekstrudaatteja. Vasemmalla olevassa ekstrudaatissa on käytetty kaurajauhon ja maitojauheen seosta, oikealla olevassa kaurajauhon/vahamaisen maissitärkkelyksen (70/30 % kuiva-aineesta) ja maitojauheen seosta. Molempien ekstrudaattien maitoproteiinipitoisuus on 10 % (kuiva-aineesta) ja maitojauheena on käytetty Eila SMP:tä. Massan vesipitoisuus on 14 %.

3.1.2 Ekstruusio

Ennen ekstruusiota työssä käytettävien kuiva-aineiden vesipitoisuudet määritettiin kuivaamalla näytteitä vuorokauden ajan (60 °C) vakuumilämpökaapissa (Salvis Vacucenter VC50; Salvis AG, Reussbuhl, Sveitsi tai Salvis LAB VC-20; Renggli AG, Rotkreuz, Sveitsi) ja jäädyttämällä näytteitä tunnin ajan fosforipentoksidia (P₂O₅) sisältävässä vakuumieksikkaattorissa. Kuiva-aineiden vesipitoisuus laskettiin käyttämällä yhtälöä 1 ja saatuja tuloksia käytettiin reseptilaskuissa.

$$\text{Vesipitoisuus (\%)} = \frac{\Delta m \text{ (massan muutos kuivauksessa)}}{m \text{ (alkuperäinen massa)}} \times 100 \quad (1)$$

Ekstruusiossa perusmassaksi valittiin esikokeiden perusteella kaurajauhon ja vahamaisen maissitärkkelyksen seos (70/30 % kuiva-aineesta). Perusmassasta valmistettiin eri pitoisuuden maitoproteiineja (8, 10 tai 12 % kuiva-aineesta) sisältäviä seoksia lisäämällä joukkoon aina yhtä kolmesta maitojauheesta. Näin ollen erilaisia seoksia valmistettiin yhteensä yhdeksän kappaletta. Kuiva-aineiden lisäksi ekstruusiossa käytettiin vesijohtovettä, jota lisättiin niin, että massan vesipitoisuudet olivat 14, 16 tai 18 %. Eri massojen ravintosisällöt kokonaispainosta ennen veden lisäystä on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Eri maitojauheita sisältävien ekstruusiomassojen ravintosisällöt / 100 g tuotetta kolmella eri maitoproteiinipitoisuudella (määrät kokonaispainosta).

maitojauhe	maitoproteiinipitoisuus ka:sta (%)	Pitoisuus (%)						proteiinin osuus energiasta (%)
		proteiini yht.	itärkkelys	sokeri	kuitu	rasva	energia (kcal/100 g)	
Eila® SMP	8	12,0	64,9	5,6	2,4	0,7	341,3	14,1
	10	13,4	62,2	7,0	2,3	0,8	341,9	15,7
	12	14,8	59,6	8,4	2,2	0,8	342,6	17,3
SMP	8	11,8	60,9	10,2	2,3	0,7	342,3	13,8
	10	13,2	57,2	12,8	2,1	0,7	343,2	15,4
	12	14,6	53,5	15,4	2,0	0,7	344,1	17,0
Eila® Sweet SMP	8	11,8	61,4	9,9	2,3	0,8	343,6	13,8
	10	13,2	57,8	12,4	2,1	0,8	344,9	15,4
	12	14,7	54,1	15,0	2,0	0,8	346,1	17,0

Ekstrudaatit valmistettiin samalla laitteella ja asetuksilla kuin esikokeissa (kuva 5). Esikokeiden tulosten ja kirjallisuuden perusteella ekstruuderin lämpötilaprofiiliksi valittiin: 20 (lohko 1), 40 (lohko 2), 70 (lohko 3), 100 (lohko 4), 110 (lohko 5), 130 (lohko 6) ja suutin 130 °C. Syöttönopeudeksi valittiin 68 g/min ja ruuvien pyörimisnopeudeksi 500 rpm. Ekstruusioajon aikana seurattiin vääntömomenttia ja painetta suuttimella. Kuiva-aineiden ja veden syöttönopeudet määritettiin jokaisen ajopäivän aluksi punnitsemalla tietyillä syöttönopeuksilla syötettyjen kuiva-aineiden ja veden massat. Saaduista tuloksista piirrettiin kuvaaja, johon sovitettiin suora, ja suoran yhtälön avulla ratkaistiin kokeissa käytettävät syöttönopeudet. Koesuunnitelma toteutettiin täydellisellä faktorikokeella, jossa käytettiin kolmea keskipistemittausta (taulukko 7). Kokeet oli jaettu yhdeksälle ajopäivälle, jolloin yhden päivän aikana tehtiin yksi koesarja yhdellä maitojauheseoksella ja maitoproteiinipitoisuudella kaikilla vesipitoisuuksilla (esim. ensimmäisenä ajopäivänä ESMP-maitojauheella maitoproteiinipitoisuudella 8 % tehtiin kokeet kaikilla vesipitoisuuksilla). Yhtenä päivänä tehtiin kokeita vain yhdellä reseptillä, sillä ekstruuderin olisi pitänyt jokaisen reseptin vaihtamisen yhteydessä puhdistaa, mikä olisi vienyt huomattavan paljon aikaa. Ennen kokeita

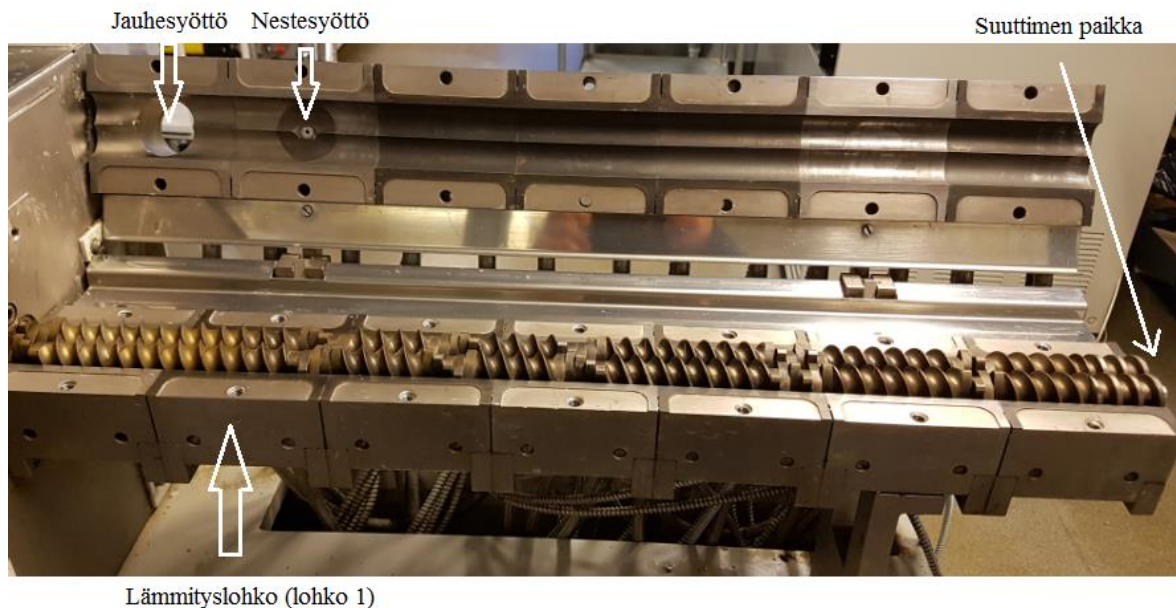
ajopäivät satunnaistettiin mahdollisuuksien mukaan (mm. raaka-aineiden saatavuuden mukaan), jonka lisäksi vesipitoisuudet kunkin ajopäivän sisällä satunnaistettiin.

Taulukko 7. Ekstruusiokokeissa käytetty täydellinen faktorikoe kolmella keskipistemittauksella. X_1 = massan maitoproteiinipitoisuus, X_2 = massan vesipitoisuus, ESMP = Eila SMP ja ESSMP = Eila Sweet SMP.

Koodatut arvot				Todelliset arvot		
koe	ajopäivä	X_1	X_2	vesipitoisuus (%)	maitoproteiinipitoisuus (%)	maitojauhe
1	1	1	-1	18	8	ESMP
2	1	-1	-1	14	8	ESMP
3	1	0	-1	16	8	ESMP
4	2	0	-1	16	8	SMP
5	2	1	-1	18	8	SMP
6	2	-1	-1	14	8	SMP
7	3	-1	1	14	12	ESSMP
8	3	1	1	18	12	ESSMP
9	3	0	1	16	12	ESSMP
10	4	0	1	16	12	ESMP
11	4	-1	1	14	12	ESMP
12	4	1	1	18	12	ESMP
13	5	-1	1	14	12	SMP
14	5	1	1	18	12	SMP
15	5	0	1	16	12	SMP
16	6	0	-1	16	8	ESSMP
17	6	-1	-1	14	8	ESSMP
18	6	1	-1	18	8	ESSMP
19	7	0	0	16	10	SMP
20	7	1	0	18	10	SMP
21	7	-1	0	14	10	SMP
22	7	0	0	16	10	SMP
23	7	0	0	16	10	SMP
24	7	0	0	16	10	SMP
25	8	0	0	16	10	ESSMP
26	8	0	0	16	10	ESSMP
27	8	0	0	16	10	ESSMP
28	8	1	0	18	10	ESSMP
29	8	0	0	16	10	ESSMP
30	8	-1	0	14	10	ESSMP
31	9	0	0	16	10	ESMP
32	9	0	0	16	10	ESMP
33	9	0	0	16	10	ESMP
34	9	-1	0	14	10	ESMP
35	9	1	0	18	10	ESMP
36	9	0	0	16	10	ESMP

Ekstruusioajoista otetuista näytteistä määritettiin vesipitoisuus, kovuus ja ekspansio. Vesipitoisuus määritettiin kolmesta ja kovuus- ja ekspansiomittaukset kymmenestä

rinnakkaisesta näytteestä. Lisäksi toteutettiin aistinvarainen arviointi (toteuttajana Valio Oy) ja näytteiden valokuvaus.



Kuva 5. Ekstruusiokokeissa käytetty kaksiruuviekstruuder, jossa ruuvit pyörivät samaan suuntaan. Kuvassa suutinta ei ole asennettuna. Kuva Janne Rauta.

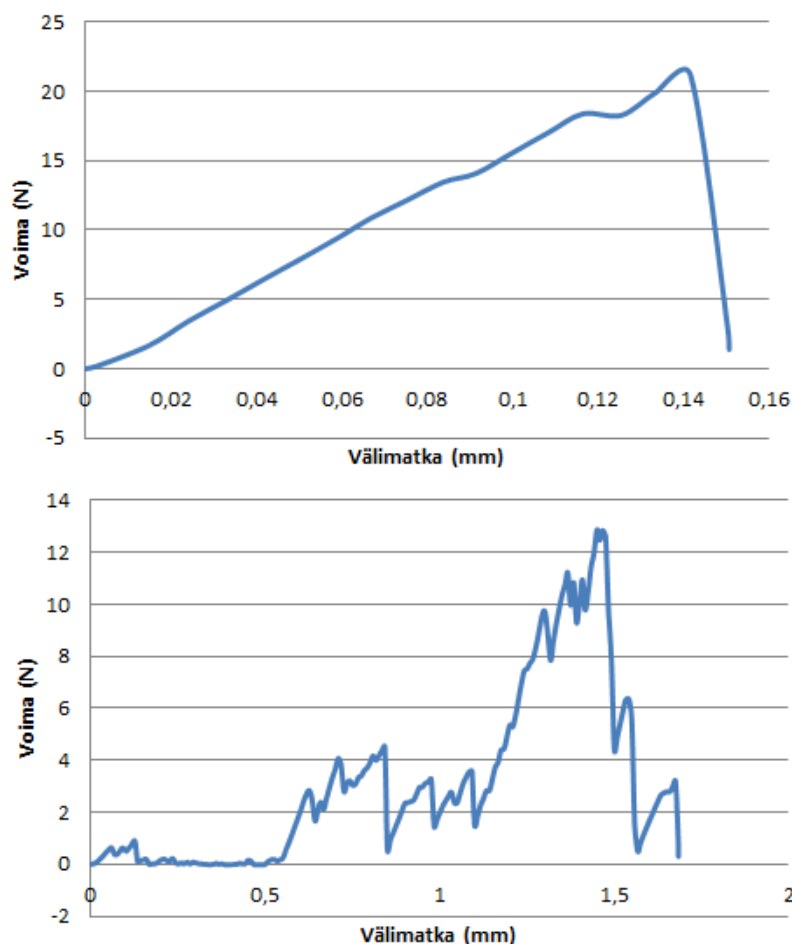
3.1.3 Vesipitoisuuden, ekspansioon ja kovuuden määrittäminen

Ekstrudaattien vesipitoisuuden määrittämistä varten näytteet punnittiin analyysivaa’alla (Precisa 92 SM-202A, Sveitsi), jonka jälkeen näytteet kuivattiin ilmakeivurissa (Hyötykasvikuivuri; Marlemi Oy, Lemi, Suomi) 72 tunnin ajan (55 °C). Kuivauksen jälkeen näytteiden annettiin jäähtyä tunnin ajan fosforipentoksidia (P₂O₅) sisältävässä vakuumeiksikkaattorissa, jonka jälkeen näytteet punnittiin ja vesipitoisuus laskettiin käyttämällä yhtälöä 1. Ekspansioon suuruutta varten ekstrudaattien halkaisijat mitattiin digitaalisella työntömittarilla, jonka jälkeen ekspansio laskettiin käyttämällä yhtälöä 2.

$$\text{Ekspansio (\%)} = \frac{\text{ekstrudaatin halkaisija (mm)} - \text{suuttimen halkaisija (mm)}}{\text{suuttimen halkaisija (mm)}} \times 100 \quad (2)$$

Kovuusmittauksia varten kaikki näytteet kuivattiin ilmakeivurissa (Hyötykasvikuivuri; Marlemi Oy, Lemi, Suomi) 72 tunnin ajan (55 °C) ja annettiin jäähtyä vakuu-ilmälämpökaapissa (Salvis Vacucenter VC50; Salvis AG, Reussbuhl, Sveitsi) tunnin ajan (huoneenlämpö). Näytteet pakattiin monikerrosmuovipussiin, jonka jälkeen ne suljettiin lämpösaumalla (HB-20; Koneteollisuus Oy, Klaukkala, Suomi). Kovuusmittaukset tehtiin Instronilla (4465, High Wycombe, Iso-Britannia) käyttäen

kolmipistetaivutusta ja 100 N:n voimakennoa. Laitteen mittapää liikkui vakionopeudella 5 mm/min. Kolmipistetaivutuksen tarkoituksena oli mallintaa ekstrudaattien purutuntumaa tilanteissa, joissa kuluttaja puraisee tuotetta. Instronista saadusta datasta piirrettiin kuvaaja, jossa ekstrudaattiin kohdistettu voima (N) oli voimakennon kulkeman matkan (mm) funktiona. Kuvaajaan sovitettiin suora, jolloin suoran kulmakertoimesta saatiin määritettyä ekstrudaattien kovuus (N/mm). Suoran sovituksessa oli huomattavan paljon vaihtelua riippuen ekstrudaattien pinnan tasaisuudesta. Kuvassa 6 on esitetty kahdesta eri kovuusmittauksesta piirretyt kuvaajat. Kuvasta voidaan havaita, että ylläolevassa kuvaajassa (maitoproteiinipitoisuus 10 % ja vesipitoisuus 18 %; maitojauheena ESSMP) suora on mahdollista piirtää hyvin helposti, koska ekstrudaatti on katkennut napakasti, kun mittapää on liikkunut ekstrudaatin lävitse. Alemmassa kuvaajassa (maitoproteiinipitoisuus 12 % ja vesipitoisuus 18 %; maitojauheena SMP) mittapään edetessä ekstrudaatissa olevat epätasaiset kohdat (ilmakuplat) ovat rikkoutuneet, jonka jälkeen mittapää on jatkanut matkaansa, ja ekstrudaatin katkeaminen on tapahtunut vasta hyvin myöhäisessä vaiheessa. Ekstrudaattien epätasaisen rakenteen vuoksi kovuusmittauksessa esiintyi runsaasti vaihtelua, ja lisäksi tuloksiin vaikutti myös tuloksia käsitelleen henkilön (tämän tutkimuksen tekijä) kädenjälki.



Kuva 6. Esimerkkikuva kovuusmittausten vaihtelevuudesta. Ylläolevassa kuvaajassa mittapää on katkaissut napakasti ekstrudaatin, kun taas alemmassa kuvaajassa mittapää on edennyt ekstrudaatin lävitse puhkoen siinä olevia ilmapuklia ilman, että ekstrudaatti on heti katkennut.

3.1.4 Aistinvarainen arviointi

Aistinvaraista arviointia varten otettiin kutakin maitojauhetta sisältäviä ekstrudaatteja, joiden maitoproteiinipitoisuudet olivat 10 % ja vesipitoisuudet 14 ja 18 %, jolloin arvioitavia näytteitä oli yhteensä kuusi kappaletta. Näytteet kuivattiin ilmakeivurissa (Hyötykasvikuivuri; Marlemi Oy, Lemi, Suomi) 72 tunnin ajan (55 °C) ja annettiin jäähtyä vakuu-ilmälämpökaapissa (Salvis Vacucenter VC50; Salvis AG, Reussbuhl, Sveitsi) tunnin ajan (huoneenlämpö). Näytteet pakattiin monikerrosmuovipusseihin ja suljettiin lämpösaumajalla (HB-20; Koneteollisuus Oy, Klaukkala, Suomi), jonka jälkeen ne lähetettiin Valio Oy:lle (Pitäjänmäki, Helsinki) aistinvaraista arviointia varten. Näytteistä arvioitiin ekstrudaattien värin tummuutta, paksuutta, kovuutta (ensipuraisu), tiiveyttä (pureskelu suussa), paahteisuutta, makeutta ja hajun voimakkuutta jana-asteikolla (arviointiasteikko 0–10), jonka päät olivat ankkuroitu (ei lainkaan – erittäin). Näytteitä

arvioi koulutettu raati ($n = 6$). Paksuus on suoraan verrannollinen ekstrudaattien halkaisijaan, jolloin paksuutta ja ekspansiota voidaan verrata keskenään.

3.1.5 Tulosten käsittely

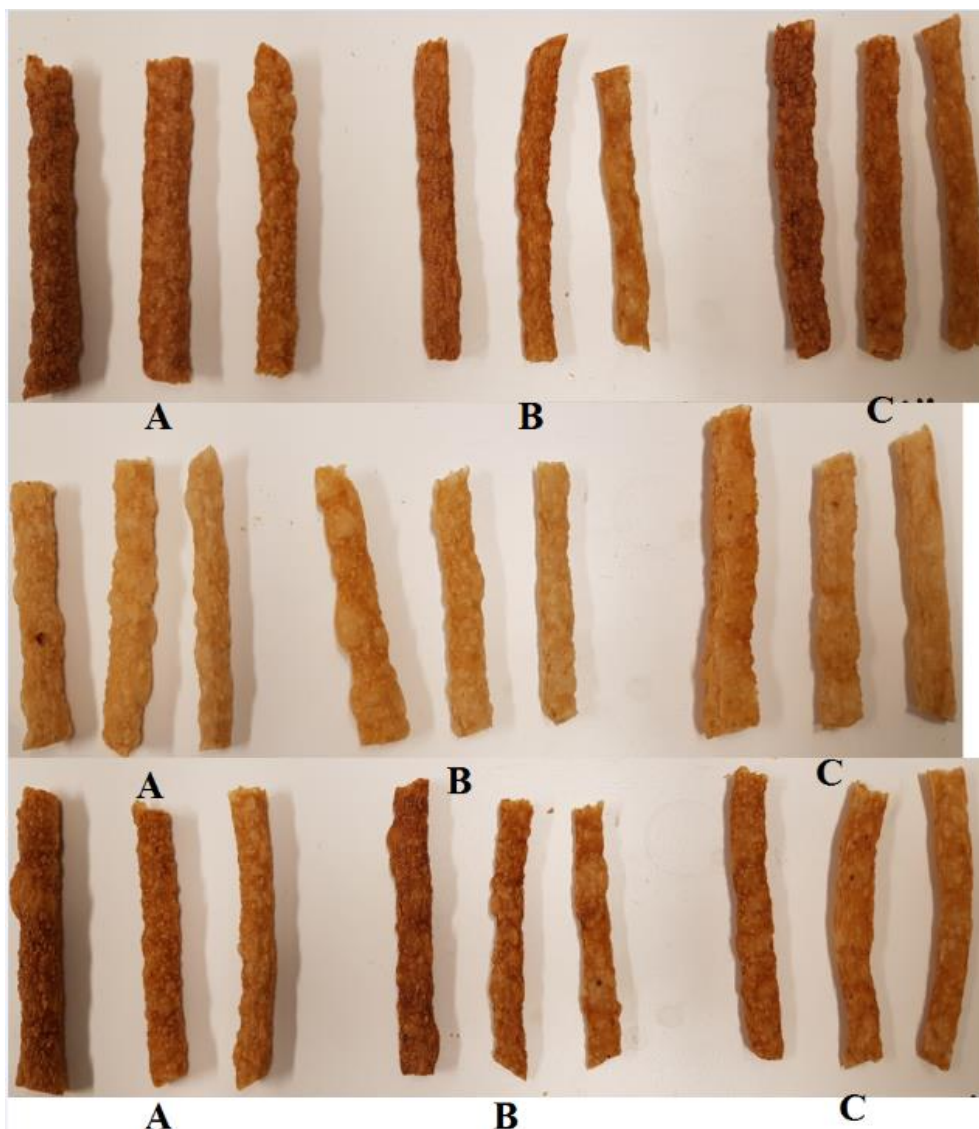
Maitoproteiinipitoisuuden ja massan vesipitoisuuden (selittävät muuttujat) muutosten vaikutusta ekstrudaattien vesipitoisuuteen, kovuuteen ja ekspansioon ja ekstruusion aikaiseen vääntömomenttiin ja paineeseen (vastemuuttujat) mallinnettiin lineaarisella regressioanalyysillä (engl. multiple linear regression, MLR) maitojauheittain (Matlab R2018b; The MathWorks, Natick, MA, Yhdysvallat). Vastemuuttujien välisiä korrelaatioita tarkasteltiin osittaisen neliösumman regressioanalyysillä (engl. partial least squares, PLS) (Matlab R2018b; The MathWorks, Natick, MA, Yhdysvallat). Maitojauheiden välisiä eroja tutkittiin split-plot-kokeilla, jossa laskentamenetelmänä käytettiin rajoitettua suurimman uskottavuuden menetelmää (engl. restricted maximum likelihood method, REML) ja regressiomallina käytettiin sekamalli (engl. mixed effects model) (Matlab R2018b; The MathWorks, Natick, MA, Yhdysvallat). Keskipistemittausten ja aistinvaraisen arvioinnin tulokset analysoitiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä (SPSS statistics 24; IBM, Armonk, NY, Yhdysvallat), jossa käytettiin Levenen testiä varianssien yhtäsuuruuksien määrittämisessä ja parametristä (Tukeyn testi) tai ei-parametristä menetelmää (Games-Howellin testi) riippuen varianssien yhtäsuuruuksista.

3.2 Tulokset

3.2.1 Ekstrudaattien ulkonäkö ja aistinvarainen arviointi

Ulkonäöllisesti ekstrudaateissa oli selviä eroavaisuuksia käytettyjen maitoproteiini- ja vesipitoisuuksien ja maitojauheiden suhteen (kuva 7 ja 8). ESMP- tai ESSMP-maitojauheita sisältävät ekstrudaatit muistuttivat toisiaan värin, koon ja pinnan tasaisuuden suhteen. Maitoproteiinipitoisuudella 10 % ESSMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit olivat kuitenkin jonkin verran tummempia kuin ESSMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit, kun taas maitoproteiinipitoisuudella 12 % tilanne oli päinvastoin. SMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit olivat sitä vastoin huomattavasti vaaleampia, niiden halkaisija oli suurempi ja pinnassa oli jonkin verran enemmän ilmakuplista johtuvaa epätasaisuutta. ESMP- tai ESSMP-maitojauheita käytettäessä massan vesipitoisuuden lisääntyessä ekstrudaattien väri vaaleni huomattavasti, kun taas SMP-maitojauheella

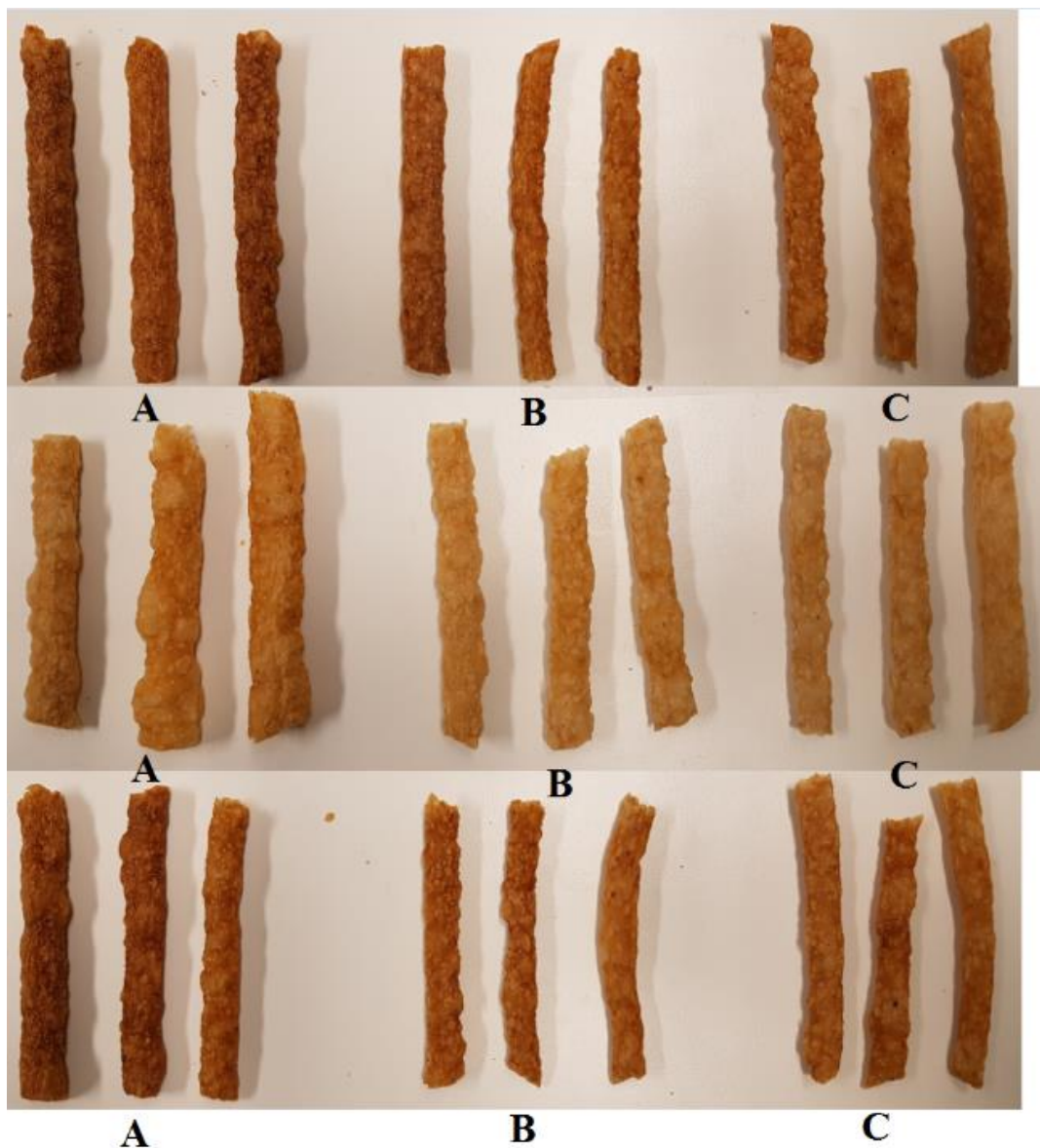
valmistetuissa ekstrudaateissa vaaleneminen oli selvästi vähäisempää (kuva 7). Kaikkien ekstrudaattien halkaisija pääsääntöisesti pieneni, kun vesipitoisuutta lisättiin, poikkeuksena ESMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit maitoproteiinipitoisuudella 8 %, joissa suurin halkaisija saatiin 16 %:n vesipitoisuudella.



Kuva 7. Vesipitoisuuden vaikutus ekstrudaattien ulkonäköön. Ylimmällä rivillä ESMP-maitojauhetta, keskimmaisella rivillä SMP-maitojauhetta ja alimmalla rivillä ESSMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit. A) Kaikissa näytteissä massan maitoproteiinipitoisuus on 8 % ja massan vesipitoisuudet vasemmalta oikealle ovat 14, 16 ja 18 %. B) Kaikissa näytteissä massan maitoproteiinipitoisuus on 10 % ja massan vesipitoisuudet vasemmalta oikealle ovat 14, 16 ja 18 %. C) Kaikissa näytteissä massan maitoproteiinipitoisuus on 12 % ja massan vesipitoisuudet vasemmalta oikealle ovat 14, 16 ja 18 %.

Massan maitoproteiinipitoisuudella ei ollut yhtä suurta vaikutusta ekstrudaattien ulkonäköön kuin vesipitoisuudella, jonka lisäksi vesipitoisuudella oli osittain vaikutusta siihen, kuinka maitoproteiinipitoisuuden muuttaminen vaikutti ekstrudaattien ulkonäköön (kuva 8). ESMP-maitojauheella maitoproteiinipitoisuuden lisääminen vaikutti ekstrudaatin halkaisijaan ja osittain väriin ylöspäin aukeavan paraabelin tavoin, jolloin keskimmaisella

maitoproteiinipitoisuudella (10 %) halkaisija oli pienimmillään ja väri vaaleimmillaan, kun taas pienimmällä ja suurimmalla maitoproteiinipitoisuudella (8 ja 12 %) halkaisija oli suurempi ja väri tummempi. SMP-maitojauheella maitoproteiinipitoisuuden lisääminen kasvatti ekstrudaattien halkaisijaa, mutta väriin sillä oli hyvin vähän vaikutusta. ESSMP-maitojauheella maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä halkaisija pääsääntöisesti pieneni ja väri vaaleni. Suurimmalla maitoproteiinipitoisuudella kaikkien ekstrudaattien pinta sai hieman kiiltoa.



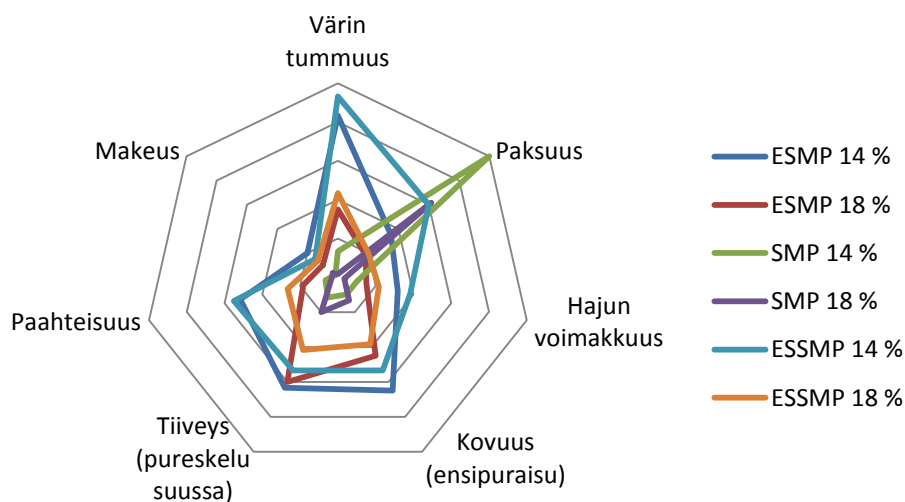
Kuva 8. Maitoproteiinipitoisuuden vaikutus ekstrudaattien ulkonäköön eri maitojauheilla. Ylimmällä rivillä ESMP-maitojauhetta, keskimmaisella rivillä SMP-maitojauhetta ja alimmalla rivillä ESSMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit. A) Kaikissa näytteissä massan vesipitoisuus on 14 % ja massan maitoproteiinipitoisuudet vasemmalta oikealle ovat 8, 10 ja 12 %. B) Kaikissa näytteissä massan vesipitoisuus on 16 % ja massan maitoproteiinipitoisuudet vasemmalta oikealle ovat 8, 10 ja 12 %. C) Kaikissa näytteissä massan vesipitoisuus on 18 % ja massan maitoproteiinipitoisuudet vasemmalta oikealle ovat 8, 10 ja 12 %.

Aistinvaraisessa arvioinnissa tutkittavista ominaisuuksista ainoastaan paahteisuudessa ja makeudessa varianssit olivat yhtäsuuria, muissa tapauksissa varianssit olivat erisuuria (taulukko 8). Paahteisuus ja makeus analysoitiin parametrisellä menetelmällä (Tukeyn testi) ja muut ominaisuudet ei-parametrisellä menetelmällä (Games-Howellin menetelmä).

Taulukko 8. Varianssien yhtäsuuruustesti (Levenen testi) aistinvaraisen arvioinnin ominaisuuksille. Nollahypoteesi (varienssit ovat yhtä suuria) hylätään, jos p-arvo on alle 0,05.

Ominaisuus	Levene Statistic	Vapausaste 1	Vapausaste 2	p-arvo
Väri	2,733	5	30	0,038
Paksuus	4,355	5	30	0,004
Haju	3,179	5	30	0,020
Kovuus	3,448	5	30	0,014
Tiiveys	2,632	5	30	0,043
Paahteisuus	2,527	5	30	0,050
Makeus	2,379	5	30	0,062

Tulosten perusteella kaikissa mitattavissa ominaisuuksissa havaittiin tilastollisesti merkitseviä eroja maitojauheiden tai vesipitoisuuksien suhteen. Aistinvaraisessa arvioinnissa havaitut eroavaisuudet eri näytteiden kesken on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1. Selkeimmät erot havaittiin ekstrudaattien paksuudessa ja värin tummuudessa (kuva 9). Värin tummuus riippui massan vesipitoisuudesta ESMP- tai ESSMP-maitojauheita sisältävissä ekstrudaateissa, joissa väri oli huomattavasti tummempi pienemmällä vesipitoisuudella. SMP-maitojauhetta sisältävissä ekstrudaateissa vesipitoisuudella ei ollut juurikaan merkitystä värin tummuuteen. Tummimmaksi arvioitiin ESSMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit (keskiarvo 9,33), joissa massan vesipitoisuus oli 14 %. Vaaleimmaksi arvioitiin SMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit (keskiarvo 0,17), joissa massan vesipitoisuus oli 18 %.



Kuva 9. Seittikaavio ekstrudaattien aistinvaraisen arvioinnin tuloksista koulutetulla raadilla ($n = 6$) kolmella eri maitojauheella. Kaikissa näytteissä massan maitoproteiinipitoisuus 10 % ja vesipitoisuus 14 tai 18 %.

Ekstrudaattien paksuus oli vahvasti riippuvainen vesipitoisuudesta, sillä kaikilla maitojauheilla alemmalla vesipitoisuudella valmistetut ekstrudaatit arvioitiin paksummiksi kuin korkeammalla vesipitoisuudella valmistetut (ESMP-maitojauhetta sisältävissä ekstrudaateissa ei kuitenkaan tilastollisesti merkitsevää eroa) (kuva 9). Paksuuden suhteen maitojauheiden välillä oli myös suurta vaihtelua, sillä SMP-maitojauhetta (vesipitoisuudella 14 %) sisältävät ekstrudaatit arvioitiin erittäin paksuksi (keskiarvo 10), kun taas ESMP-maitojauheella (vesipitoisuudella 14 %) saatiin huomattavasti ohuempia ekstrudaatteja (keskiarvo 3,5). Paksuuden arviointi oli myös linjassa aikaisemmin todetun väitteen kanssa, että vesipitoisuuden lisääminen vähentää ekspansiota.

Hajun voimakkuudessa oli huomattavasti vähemmän eroja kuin värissä ja paksuudessa, sillä ainoastaan SMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit erosivat tilastollisesti merkitsevästi yhdestä näytteestä (ESMP 14 %) (kuva 9). Kaikkien ekstrudaattien hajun voimakkuus arvioitiin melko pieneksi.

Paahteisuudessa havaittiin selviä eroja niin vesipitoisuuksien kuin maitojauheidenkin suhteen (kuva 9). Paahteisuus pieneni huomattavasti, kun vesipitoisuutta lisättiin, jolloin saman maitojauheen sisällä oli tilastollisesti merkitseviä eroja eri vesipitoisuuksilla, pois

lukien SMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit, jotka arvioitiin lähes yhtä paahteisiksi kummallakin vesipitoisuudella. SMP-maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien paahteisuus oli erittäin vähäistä, kun taas ESMP- ja ESSMP-maitojauheita sisältävät ekstrudaatit arvioitiin paahteisemmiksi ja näiden paahteisuudet olivat lähes yhtä suuret.

Ekstrudaattien makeudet arvioitiin hyvin pieniksi ja ainoa tilastollisesti merkitsevä ero havaittiin ESMP (14 %)- ja SMP (14 ja 18 %) -maitojauheiden välillä (kuva 9). Suurin makeus oli ESMP (14 %) -maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla (keskiarvo 2,00) ja pienin SMP (14 %) -maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla (keskiarvo 0,17), joten erot ekstrudaattien makeuksissa olivat hyvin pienet.

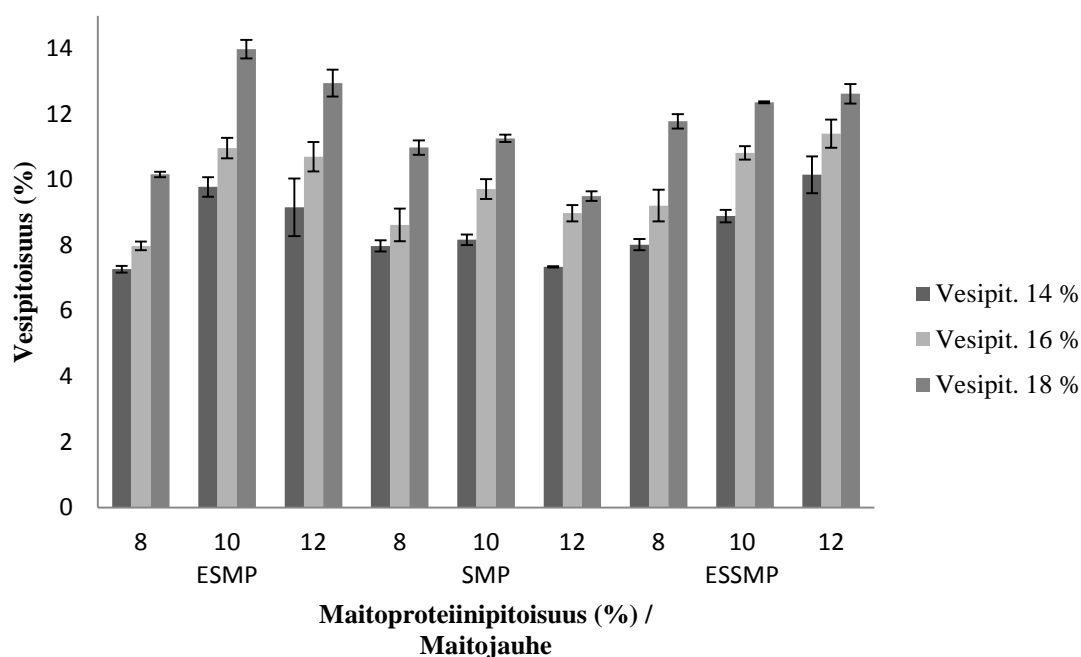
Kovuuden arvioinnissa SMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit arvioitiin vähiten koviksi ja nämä ekstrudaatit erosivat tilastollisesti merkitsevästi muiden maitojauheiden ekstrudaateista (pois lukien ESMP 18 %) (kuva 9). Kovuus pääsääntöisesti vähentyi, kun vesipitoisuus lisääntyi.

Tiiveys arvioitiin lähes samanlaiseksi kuin kovuus, sillä SMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit arvioitiin vähiten tiiviiksi ja nämä ekstrudaatit erosivat tilastollisesti merkitsevästi muiden maitojauheiden ekstrudaateista (pois lukien ESSMP 18 %) (kuva 9).

3.2.2 Ekstrudaattien ominaisuudet ja ekstruusioajojen mittaustulokset

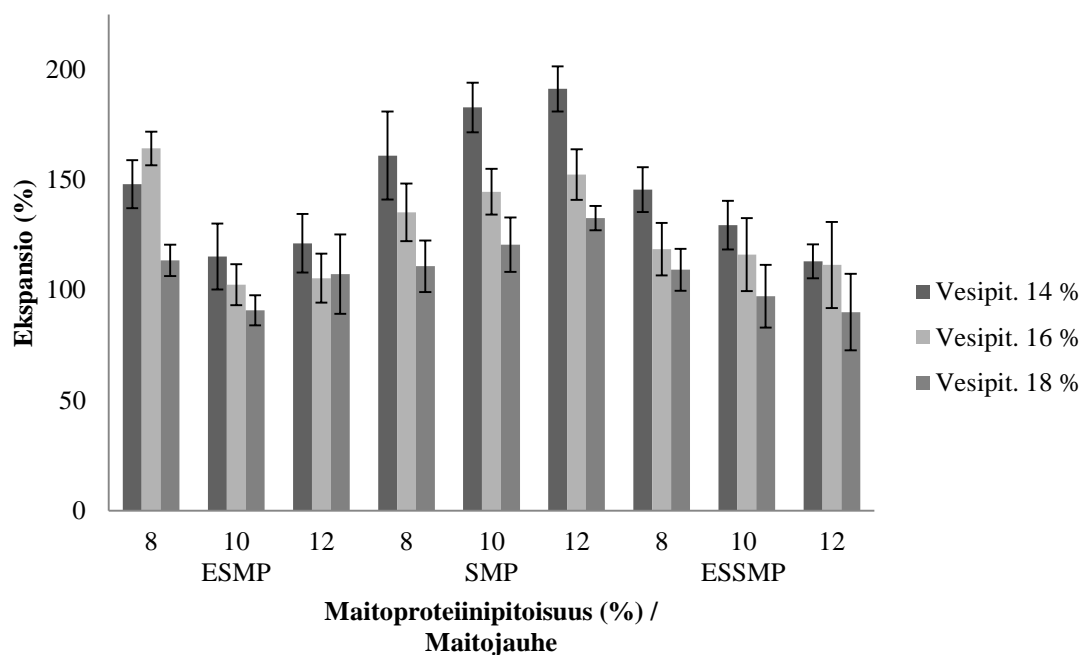
Ekstrudaattien ominaisuuksissa (vesipitoisuus, ekspansio ja kovuus) ja ekstruusioajojen mittaustuloksissa (vääntömomentti ja paine suuttimella) havaittiin selkeitä eroja massan maitoproteiini- ja vesipitoisuuksien sekä maitojauheiden välillä. Kaikkien mittausten tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2. Keskihajonnat vaihtelivat hyvin paljon riippuen mitattavasta ominaisuudesta. Vähiten suhteellista hajontaa (keskihajonta/keskiarvo) oli ekstrudaattien vesipitoisuudessa (kaikkien ekstrudaattien keskiarvo 2,7 %) ja eniten kovuudessa (kaikkien ekstrudaattien keskiarvo 29,0 %) (liite 2). Mitattavien ominaisuuksien suhteen maitojauheiden välillä ei ollut suuria eroja keskihajontojen suhteen, lukuun ottamatta ekspansiota, jossa ESSMP-maitojauhetta sisältävissä ekstrudaateissa ekspansion suhteellinen keskihajonta oli yli 50 % suurempi kuin SMP-maitojauhetta sisältävissä ekstrudaateissa.

Ekstrudaattien vesipitoisuudet vaihtelivat välillä 7–13 % (kuva 10). Ekstrudaattien vesipitoisuus lisääntyi massan vesipitoisuuden lisääntyessä kaikilla maitoproteiinipitoisuuksilla ja maitojauheilla. Massan maitoproteiinipitoisuus vaikutti ESMP- tai SMP-maitojauheita sisältävien ekstrudaattien vesipitoisuuteen alaspäin aukeavan paraabelin tavoin, jolloin suurin vesipitoisuus oli keskimmaisella maitoproteiiniipitoisuudella kaikilla massan vesipitoisuuksilla. ESSMP-maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien vesipitoisuus lisääntyi maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä kaikilla massan vesipitoisuuksilla. Pienimmät vesipitoisuudet (7,3 %) olivat ESMP (maitoproteiinipitoisuudella 8 %)- ja SMP-maitojauheita (maitoproteiinipitoisuudella 12 %) sisältävillä ekstrudaateilla, kun massan vesipitoisuus oli 14 %. Suurin vesipitoisuus (13,0 %) oli ESMP-maitojauhetta (maitoproteiinipitoisuudella 12 %) sisältävillä ekstrudaateilla, kun massan vesipitoisuus oli 18 %.



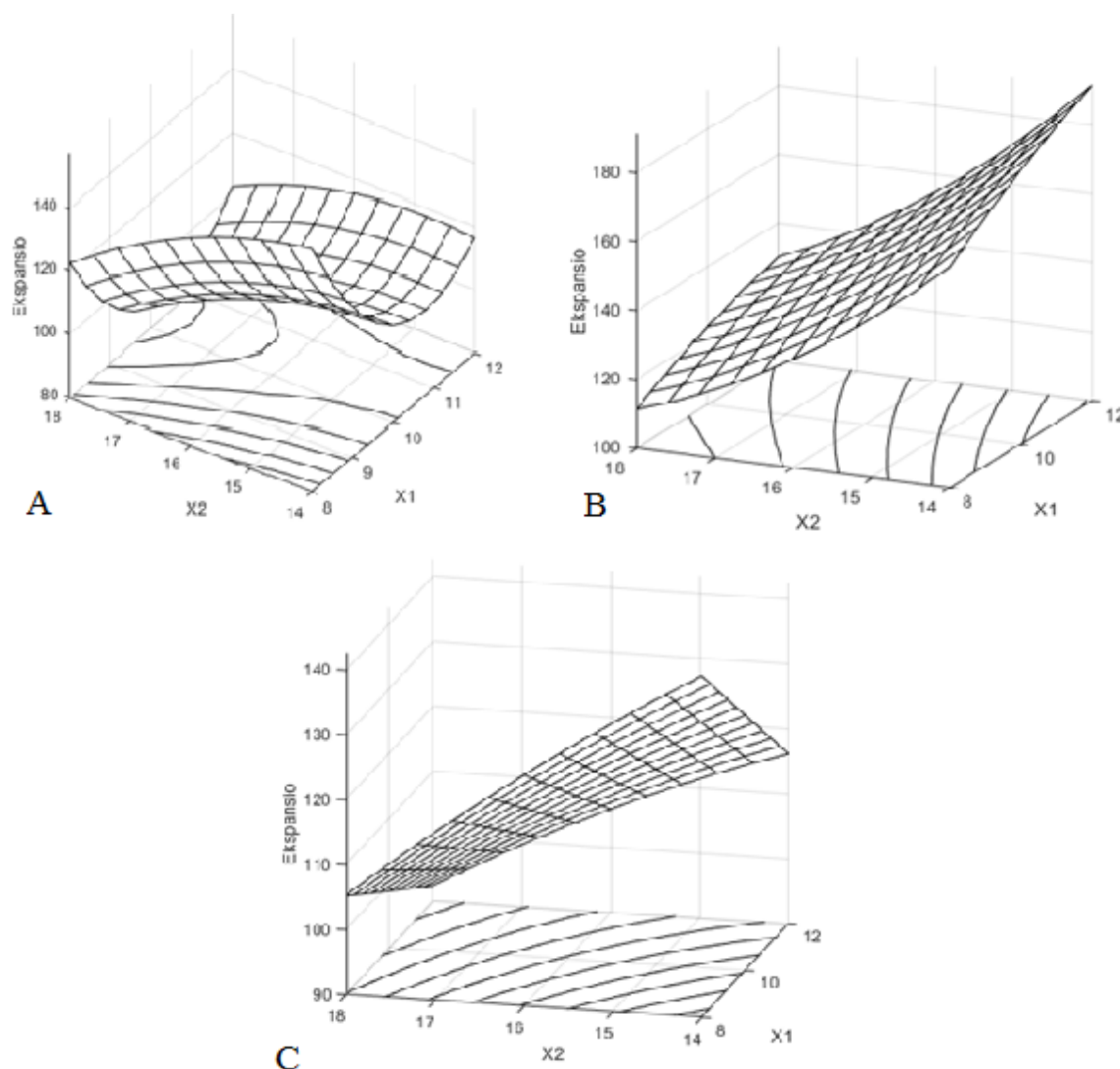
Kuva 10. Ekstrudaattien vesipitoisuudet massan eri maitoproteiini- ja vesipitoisuuksilla kolmella eri maitojauheella (ESMP = Eila SMP ja ESSMP = Eila Sweet SMP).

Ekstrudaattien ekspansio suuruus vaihteli välillä 90–190 % (kuva 11). Pienin ekspansio oli (90,0 %) ESSMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla, kun massan maitoproteiinipitoisuus oli 12 % ja vesipitoisuus 18 %. Suurin ekspansio (191,2 %) oli SMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla, kun massan maitoproteiinipitoisuus oli 12 % ja vesipitoisuus 14 %.



Kuva 11. Ekstrudaattien ekspansiot massan eri maitoproteiini- ja vesipitoisuuksilla kolmella eri maitojauheella (ESMP = Eila SMP ja ESSMP = Eila Sweet SMP).

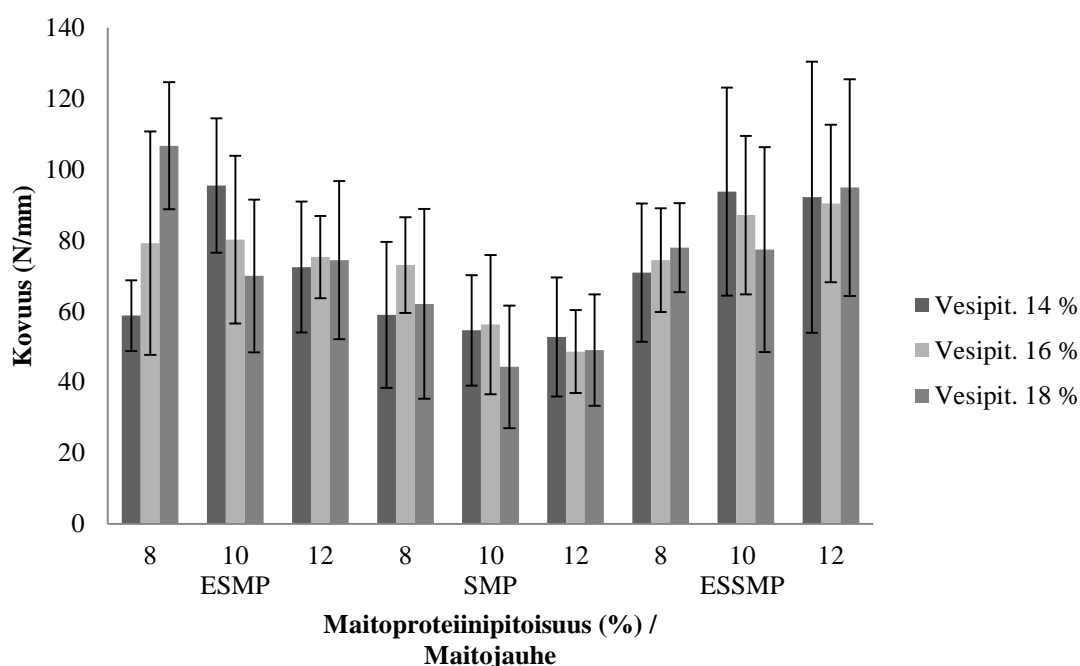
Massan maitoproteiinipitoisuus vaikutti ekspansioon eri tavalla riippuen käytetystä maitojauheesta (kuva 12). ESMP-maitojauheella maitoproteiinipitoisuuden lisääminen vaikutti ekspansioon ylöspäin aukeavan paraabeliin tavoin, ESSMP-maitojauheella maitoproteiinipitoisuuden lisääminen pienensi ekstrudaattien ekspansiota ja SMP-maitojauheella maitoproteiinipitoisuuden lisääminen kasvatti ekstrudaattien ekspansiota. Massan vesipitoisuuden lisääntyessä ekspansion suuruus pieneni kaikilla maitojauheilla, lukuunottamatta yhtä näytettä (ESMP-maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien ekspansio maitoproteiinipitoisuudella 8 % oli suurin, kun vesipitoisuus oli 16 %).



Kuva 12. Selittävien muuttujien X_1 (maitoproteiinipitoisuus) ja X_2 (massan vesipitoisuus) vaikutus A) Eila SMP -maitojauhetta, B) SMP-maitojauhetta ja C) Eila Sweet SMP -maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien ekspansioon.

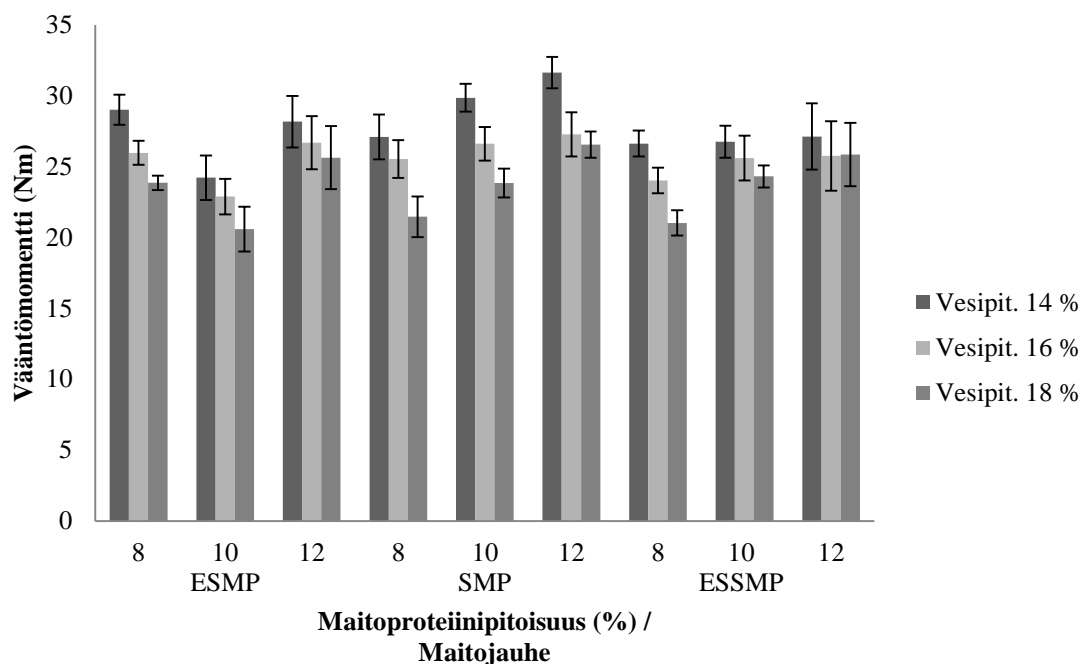
Ekstrudaattien kovuudet vaihtelivat välillä 44–107 N/mm (kuva 13). Massan vesipitoisuuden vaikutus kovuuteen riippui hyvin vahvasti käytetystä maitoproteiinipitoisuudesta. Pienimmällä maitoproteiinipitoisuudella (8 %) massan vesipitoisuuden lisääminen pääsääntöisesti lisäsi ekstrudaattien kovuutta kaikilla maitojauheilla. Keskimmaisella maitoproteiinipitoisuudella (10 %) massan vesipitoisuuden lisääminen sitävastoin pääsääntöisesti pienensi kovuutta kaikilla maitojauheilla. Suurimmalla maitoproteiinipitoisuudella (12 %) massan vesipitoisuuden lisääminen ei vaikuttanut ekstrudaattien kovuuksiin millään maitojauheella. Massan maitoproteiinipitoisuuden vaikutus kovuuteen riippui massan vesipitoisuudesta ja käytetystä maitojauheesta. Maitoproteiinipitoisuuden lisääminen pienensi kovuutta SMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla mutta lisäsi kovuutta ESSMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla pääsääntöisesti kaikilla vesipitoisuuksilla. ESMP-maitojauhetta

sisältävillä ekstrudaateilla massan maitoproteiinipitoisuuden vaikutus riippui massan vesipitoisuudesta, jolloin pienimmällä vesipitoisuudella (14 %) massan maitoproteiinipitoisuuden lisääminen vaikutti kovuuteen alaspäin aukeavan paraabelin tavoin, keskimmaisella vesipitoisuudella (16 %) maitoproteiinipitoisuudella ei ollut vaikutusta ja suurimmalla vesipitoisuudella (18 %) maitoproteiinipitoisuus vaikutti kovuuteen ylöspäin aukeavan paraabelin tavoin. Pienin kovuus (44,3 N/mm) oli SMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla, kun massan maitoproteiinipitoisuus oli 10 % ja vesipitoisuus 18 %. Suurin kovuus (106,7 N/mm) oli ESMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla, kun massan maitoproteiinipitoisuus oli 8 % ja vesipitoisuus 18 %.



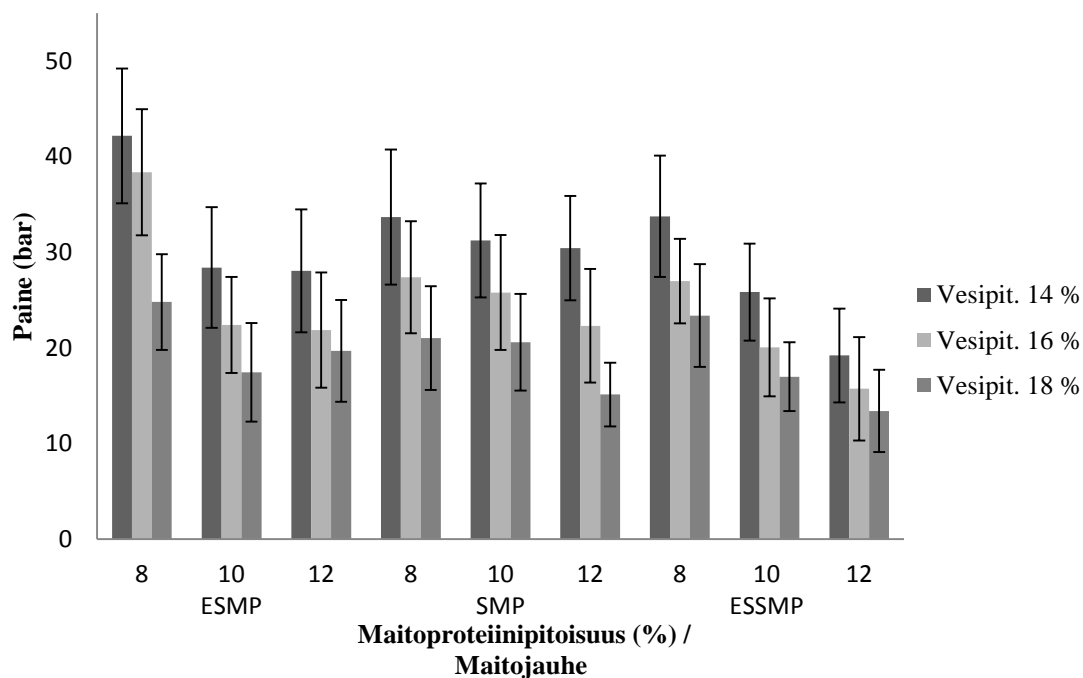
Kuva 13. Ekstrudaattien kovuudet massan eri maitoproteiini- ja vesipitoisuuksilla kolmella eri maitojauheella (ESMP = Eila SMP ja ESSMP = Eila Sweet SMP).

Vääntömomentti ekstrusioajon aikana vaihteli välillä 20,6–31,6 Nm (kuva 14). Massan vesipitoisuuden lisääntyessä vääntömomentti pieneni kaikilla maitoproteiinipitoisuuksilla kaikilla maitojauheilla. ESMP-maitojauheella vääntömomentti muuttui ylöspäin aukeavan paraabelin tavoin maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä. SMP-maitojauheella vääntömomentti kasvoi maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä. ESSMP-maitojauheella vääntömomentti pysyi samana tai kasvoi hieman, kun maitoproteiinipitoisuutta lisättiin. Vääntömomentti oli pienimmillään (20,6 Nm) ekstrusioajossa, jossa käytettiin ESMP-maitojauhetta, jonka massan maitoproteiinipitoisuus oli 10 % ja vesipitoisuus 18 %. Suurin vääntömomentti (31,6 Nm) oli ekstrusioajossa, jossa käytettiin SMP-maitojauhetta, jonka massan maitoproteiinipitoisuus oli 12 % ja vesipitoisuus 14 %.



Kuva 14. Ekstruusioajojen vääntömomentti massan eri maitoproteiini- ja vesipitoisuuksilla kolmella eri maitojauheella (ESMP = Eila SMP ja ESSMP = Eila Sweet SMP).

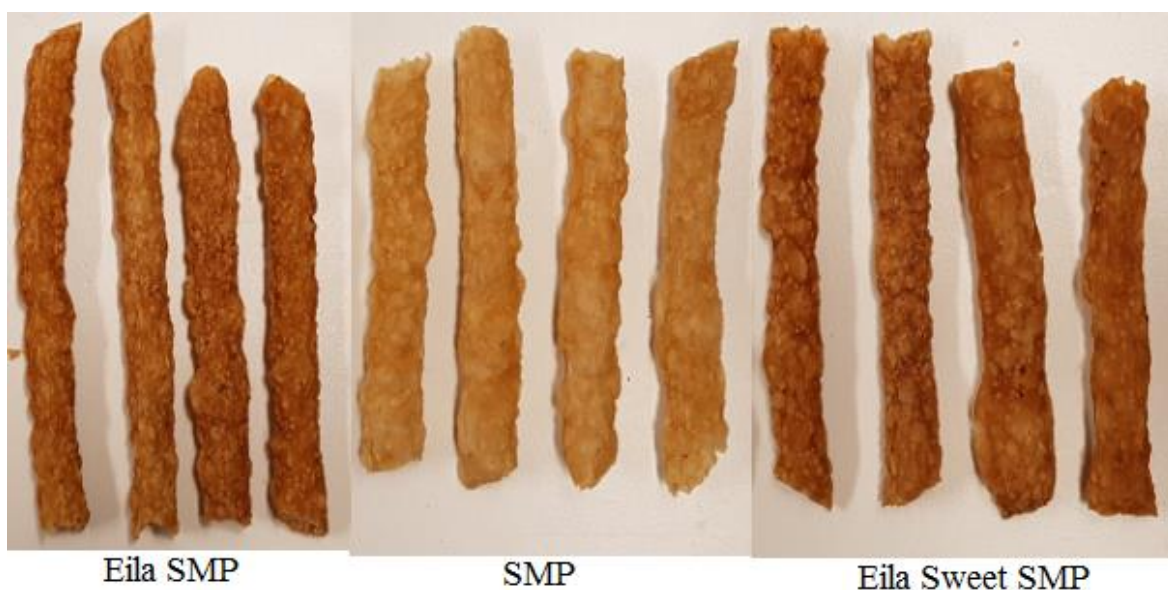
Paine suuttimella ekstruusioajojen aikana vaihteli välillä 13–43 bar (kuva 15). Massan maitoproteiinipitoisuuden ja vesipitoisuuden lisääntyessä paine suuttimella ekstruusioajon aikana pääsääntöisesti pieneni kaikilla maitojauheilla. Paine oli pienimmillään (13,4 bar) ekstruusioajossa, jossa käytettiin ESSMP-maitojauhetta, jonka massan maitoproteiinipitoisuus oli 12 % ja vesipitoisuus 18 %. Suurin paine (42,2 bar) oli ekstruusioajossa, jossa käytettiin ESMP-maitojauhetta, jonka massan maitoproteiinipitoisuus oli 8 % ja vesipitoisuus 14 %.



Kuva 15. Ekstruusioajojen paine massan eri maitoproteiini- ja vesipitoisuuksilla kolmella eri maitojauheella (ESMP = Eila SMP ja ESSMP = Eila Sweet SMP).

3.2.3 Keskipistemittaukset

Keskipistemittausajoissa (massan maitoproteiinipitoisuus 10 % ja vesipitoisuus 16 %) saatiin tasalaatuisia tuotteita eikä näytteiden välillä ollut merkittäviä eroja ulkonäön suhteen (kuva 16). Paksuudessa oli kuitenkin havaittavissa jonkin verran eroja, etenkin ESSMP-maitojauhetta sisältävissä ekstrudaateissa. Väri ja pinnan tasaisuus olivat suhteellisen tasalaatuisia kaikilla maitojauheilla.



Kuva 16. Keskipistemittauksista (massan maitoproteiinipitoisuus 10 % ja vesipitoisuus 16 %) saadut ekstrudaatit kolmella eri maitojauheella.

Keskipistemittauksissa tutkittavista ominaisuuksista ainoastaan kovuudessa varianssit eivät olleet yhtä suuria (taulukko 9). Kaikki muut ominaisuudet paitsi kovuus analysoitiin parametrisellä menetelmällä (Tukeyn testi). Kovuus analysoitiin ei-parametrisellä menetelmällä (Games-Howellin testi).

Taulukko 9. Varianssien yhtäsuuruustesti (Levenen testi) keskipistemittauksien ominaisuuksille. Nollahypoteesi (varianssit ovat yhtä suuret) hylätään, jos p-arvo alle 0,05.

Mitattu ominaisuus	Levene Statistic	Vapausaste 1	Vapausaste 2	p-arvo
Vesipitoisuus	0,246	2	9	0,787
Ekspansio	3,648	2	9	0,069
Kovuus	6,257	2	9	0,020
Vääntömomentti	0,100	2	9	0,905
Paine	0,047	2	9	0,955

SMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit erosivat selvästi ESMP- ja ESSMP-maitojauheita sisältävistä ekstrudaateista (taulukko 10). Vesipitoisuuden, ekspansion ja kovuuden suhteen SMP-maitojauhetta sisältävät ekstrudaatit erosivat tilastollisesti merkitsevästi ESMP- ja ESSMP-maitojauheita sisältävistä ekstrudaateista, jonka lisäksi paine suuttimella ekstruusioajon aikana erosi tilastollisesti merkitsevästi SMP-maitojauhetta käytettäessä. ESMP- ja ESSMP-maitojauheita sisältävät ekstrudaatit erosivat toisistaan ainoastaan ekspansion suhteen, vaikkakin ero oli melko pieni. Lisäksi vääntömomentissa ekstruusioajon aikana oli tilastollisesti merkitsevä ero.

Taulukko 10. Keskipistemittauksista (massan maitoproteiinipitoisuus 10 % ja vesipitoisuus 16 %) saadut tulokset ekstrudaattien ominaisuuksista ja ekstruusion aikaisesta vääntömomentista ja paineesta suuttimella kolmella eri maitojauheella (yksisuuntainen varianssianalyysi, Tukeyn ja Games-Howellin testit). Kussakin sarakkeessa eri kirjaimilla merkityt tulokset eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi

Keskiarvot ja -hajonnat					
maitojauhe	vesipitoisuus (%)	ekspansio (%)	kovuus (N/mm)	vääntömomentti (Nm)	paine (bar)
Eila SMP	11,0 ± 0,3 b	102,4 ± 2,1 a	80,2 ± 8,7 b	22,9 ± 0,6 a	22,4 ± 1,2 a
SMP	9,7 ± 0,5 a	144,6 ± 5,9 c	56,2 ± 3,3 a	26,6 ± 0,7 b	25,8 ± 1,1 b
Eila Sweet SMP	10,8 ± 0,5 b	116,1 ± 7,7 b	87,1 ± 4,4 b	25,6 ± 0,6 b	20,1 ± 1,0 a

Vesipitoisuuksissa oli melko vähän hajontaa kaikilla käytettävillä maitojauheilla (taulukko 10). Ekspansiossa hajontaa oli selkeästi enemmän, sillä ESSMP-maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien keskihajonta (7,7 prosenttiyksikköä) oli yli kolme kertaa suurempi kuin ESMP-maitojauheita sisältävien ekstrudaattien keskihajonta (2,1 prosenttiyksikköä). Kovuudessa oli myös selvästi hajontaa ja esimerkiksi ESMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla keskihajonta (8,7 prosenttiyksikköä) oli yli kaksi kertaa suurempi kuin

SMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla (3,3 prosenttiyksikköä). Vääntömomentissa ja paineessa keskihajonta oli hyvin pientä eikä maitojauheiden välillä ollut juurikaan eroja.

Keskipistemittausajojen väliset hajonnat olivat kuitenkin huomattavasti pienemmät kuin ajojien sisällä olevien rinnakkaisnäytteiden hajonnat (taulukko 10 ja liite 2). Esimerkiksi ESMP-maitojauhetta (maitoproteiinipitoisuudella 10 % ja vesipitoisuudella 16 %) sisältävien ekstrudaattien 10 rinnakkaisen ekspansiomittauksen keskihajonta oli yhdessä ajossa peräti 11,6 prosenttiyksikköä, kun taas keskipistemittausten välinen hajonta oli ainoastaan 2,1 prosenttiyksikköä.

3.2.4 Regressioanalyysin tulokset

MLR-analyysi

MLR-analyysin mukaan maitoproteiinipitoisuuden lisääminen lisäsi ekstrudaattien vesipitoisuutta ESMP- ja ESSMP-maitojauheita sisältävissä ekstrudaateissa, mutta ei SMP-maitojauhetta sisältävissä ekstrudaateissa (taulukko 11). Maitoproteiinipitoisuus vaikutti tilastollisesti merkitsevästi ekstrudaattien ekspansioon kaikilla maitojauheilla. ESMP- ja ESSMP-maitojauheita sisältävissä ekstrudaateissa maitoproteiinipitoisuuden lisääminen pienensi ekspansiota, kun taas SMP-maitojauheessa vaikutus oli päinvastainen. Maitoproteiinipitoisuus vaikutti vaihtelevasti ekstrudaattien kovuuksiin riippuen maitojauheesta. Maitoproteiinipitoisuuden lisääminen vähensi SMP-maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien kovuutta, lisäsi ESSMP-maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien kovuutta ja ESMP-maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien kovuuteen sillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta. Maitoproteiinipitoisuuden lisääminen kasvatti vääntömomenttia, kun ekstruusioajossa käytettiin SMP- ja ESSMP-maitojauheita, mutta ESMP-maitojauhetta käytettäessä sillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta. Painesuuttimella pieneni ekstruusioajoissa kaikilla maitojauheilla, kun maitoproteiinipitoisuutta lisättiin.

Taulukko 11. MLR (multiple linear regression) -mallin ($y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2$) β -parametrien estimaatit selittävälle muuttujille (maitoproteiinipitoisuus ja massan vesipitoisuus) ja niiden vaikutus vastemuuttujiin kolmella eri maitojauheella.

Eila SMP -maitojauhe										
Vastemuuttuja	X₁	X₂	X₁²	X₂²	X₁X₂	Vakiotermi	R²	R²-adj.	p	Q²
vesipitoisuus (%)	+1,23***	+1,81***	-1,81***	+0,73*	+0,23	+11,03***	0,98	0,96	0,54	+0,89
ekspansio (%)	-15,3*	-12,17*	+25,93**	-5,88	+5,15	+104,6***	0,85	0,73	0,01	-0,41
kovuus (N/mm)	-3,74	+4,06	-3,79	+1,68	-11,49	+80,45***	0,39	-0,11	0,21	-3,9
vääntömomentti (Nm)	+0,28	-1,89***	+3,85***	-0,07	+0,65	+22,74***	0,97	0,95	0,81	+0,92
paine suuttimella (bar)	-5,95***	-6,12***	+6,75**	-0,45	+2,25	+22,71***	0,96	0,92	0,18	+0,67
SMP-maitojauhe										
Vastemuuttuja	X₁	X₂	X₁²	X₂²	X₁X₂	Vakiotermi	R²	R²-adj.	p	Q²
vesipitoisuus (%)	-0,29	+1,38***	-0,84*	+0,08	-0,21	+9,69***	0,89	0,8	0,57	+0,40
ekspansio (%)	+11,53**	-28,5***	-1,78	+6,13	-2,10	+144,89***	0,97	0,94	0,80	+0,88
kovuus (N/mm)	-7,28*	-1,82	+5,42	-5,94	-1,72	+55,93***	0,76	0,56	0,23	-0,87
vääntömomentti (Nm)	+1,89**	-2,79***	-0,19	+0,26	+0,14	+26,60***	0,93	0,87	0,33	+0,50
paine suuttimella (bar)	-2,37**	-6,44***	-0,90	+0,17	-0,66	+25,77***	0,97	0,95	0,56	+0,84
Eila Sweet SMP -maitojauhe										
Vastemuuttuja	X₁	X₂	X₁²	X₂²	X₁X₂	Vakiotermi	R²	R²-adj.	p	Q²
vesipitoisuus (%)	+0,86**	+1,62***	-0,25	+0,07	-0,32	+10,73***	0,94	0,90	0,73	+0,78
ekspansio (%)	-9,83*	-15,27**	+0,05	-1,65	+3,35	+115,68***	0,85	0,72	0,70	+0,32
kovuus (N/mm)	+9,03*	-1,10	-3,15	+0,02	-1,09	+86,57***	0,69	0,43	0,28	-1,29
vääntömomentti (Nm)	+1,18**	-1,55***	-0,55	+0,10	+1,08*	+25,54***	0,93	0,87	0,73	+0,70
paine suuttimella (bar)	-5,97***	-4,17***	+1,16	+1,22	+1,14*	+20,11***	0,99	0,98	0,93	+0,96

X₁ = maitoproteiinipitoisuus, X₂ = massan vesipitoisuus, X₁² = neliöllinen vaikutus maitoproteiinipitoisuuteen, X₂² = neliöllinen vaikutus massan vesipitoisuuteen, X₁X₂ = yhdysvaikutustermi maitoproteiinipitoisuus ja massan vesipitoisuus, R² = selitysaste, R²-adj. = korjattu selitysaste, P = mallin puutteellisuus, Q² = ennustusaste. Tilastollisesti merkitsevä, jos *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001.

Massan vesipitoisuuden lisääminen lisäsi oletetusti ekstrudaattien vesipitoisuutta kaikilla maitojauheilla (taulukko 11). Vesipitoisuuden lisääminen pienensi ekspansiota kaikilla maitojauheilla. Vesipitoisuuden lisäämisellä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta ekstrudaattien kovuuteen millään maitojauheella. Vesipitoisuuden lisääminen pienensi vääntömomenttia ja painetta ekstruusioajon aikana kaikilla maitojauheilla.

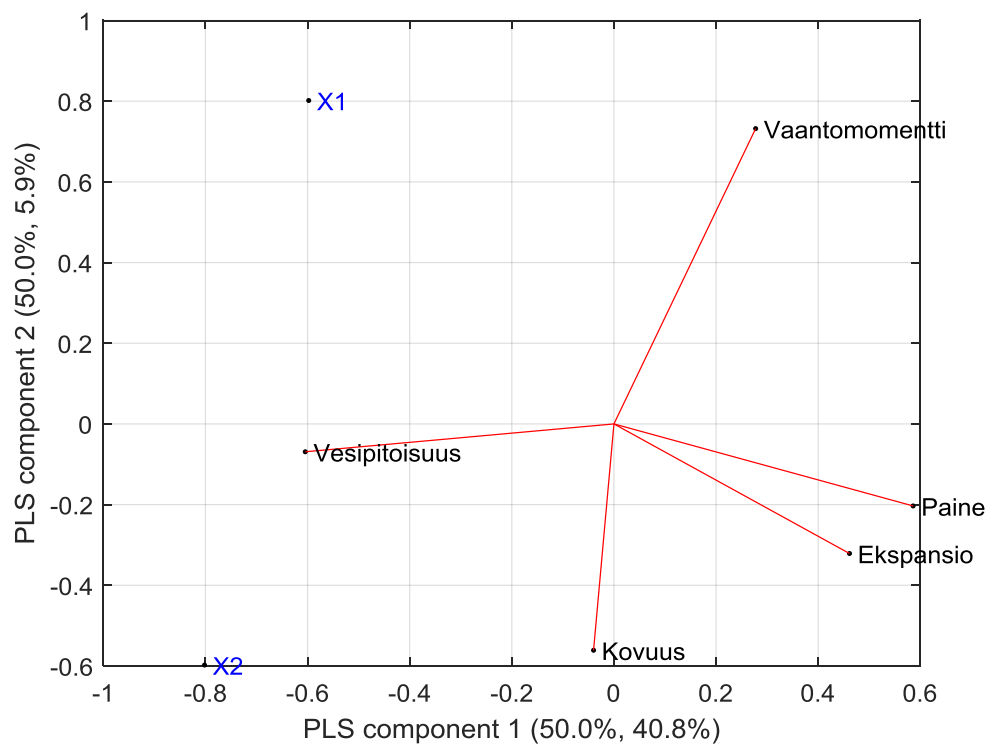
Päävaikutusten lisäksi regressioanalyysissä havaittiin jonkin verran neliöllisiä vaikutuksia ja yhdysvaikutuksia (taulukko 11). Esimerkiksi massan vesipitoisuudella oli tilastollisesti merkitsevää neliöllistä vaikutusta ekstrudaattien vesipitoisuuteen ESMP-maitojauheella, mutta ei SMP- ja ESSMP-maitojauheilla. Sen sijaan maitoproteiinipitoisuudella ja massan vesipitoisuudella ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhdysvaikutusta ekstrudaattien ominaisuuksiin (vesipitoisuus, ekspansio ja kovuus) millään maitojauheella, mutta

ESSMP-maitojauheella havaittiin tilastollisesti merkitsevää yhdysvaikutusta ekstrusioajon aikaiseen vääntömomenttiin ja paineeseen.

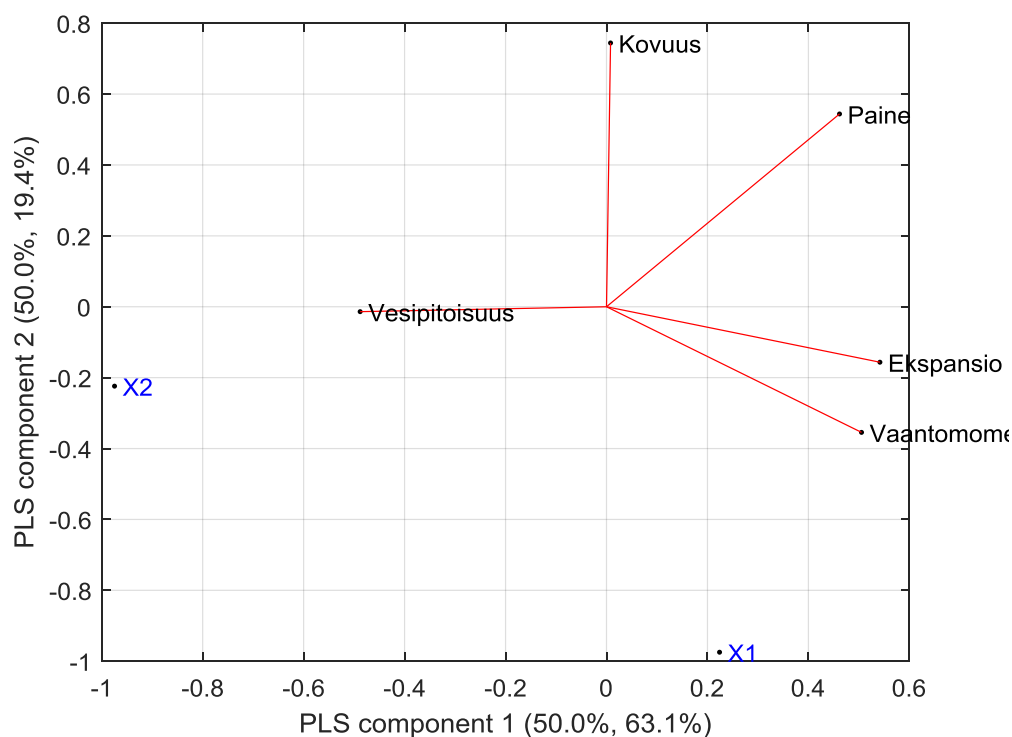
Mallin korjattu selitysaste (R^2 -adj.) kaikilla maitojauheilla oli hyvä kaikilla muilla vastemuuttujilla paitsi kovuudella (taulukko 11). ESMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla mallin selitysaste oli erittäin huono kovuuden suhteen (R^2 -adj. = -0,11) ja SMP- ja ESSMP-maitojauheilla kohtalainen. Malli oli puutteellinen ainoastaan ekspansion suhteen ESMP-maitojauheella. Ennustusselityste (Q^2) oli myös hyvä tai kohtalainen kaikilla muilla vastemuuttujilla paitsi kovuudella ja ESMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla myös ekspansiolla.

PLSR-analyysi

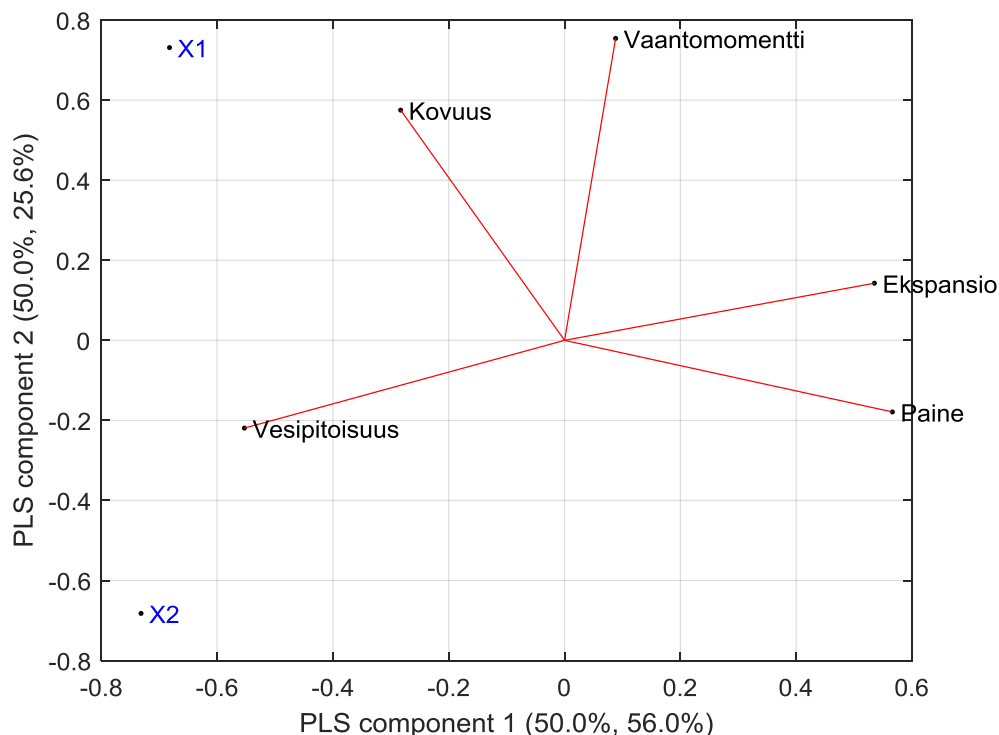
PLS-regressioanalyysillä selvitettiin vastemuuttujien välisiä korrelaatioita kullakin maitojauheella. Korrelaatiot on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 3. Kaikilla käytetyillä maitojauheilla ekstrudaattien vesipitoisuus korreloi negatiivisesti paineen ja ekspansion kanssa, mutta ei juurikaan kovuuden kanssa (kuva 17, 18 ja 19). Ekspansio ja paine taas korreloivat positiivisesti keskenään kaikilla käytetyillä maitojauheilla. Ekspansio ja kovuus eivät juurikaan korreloineet keskenään ESMP- ja SMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla, mutta ESSMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla ekspansio ja kovuus korreloivat negatiivisesti keskenään. Kovuuden ja vääntömomentin korrelaatioissa oli huomattavia eroja riippuen käytetystä maitojauheesta. ESMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla kovuus korreloi negatiivisesti vääntömomentin kanssa, SMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla kovuus ei juurikaan korreloinut vääntömomentin kanssa ja ESSMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla kovuus korreloi positiivisesti vääntömomentin kanssa.



Kuva 17. Weight plot -kuvaaja PLS-regressioanalyysillä määritetyistä korrelaatioista vastemuuttujien välillä Eila SMP -maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla. X_1 = maitoproteiinipitoisuus ja X_2 = massan vesipitoisuus.



Kuva 18. Weight plot -kuvaaja PLS-regressioanalyysillä määritetyistä korrelaatioista vastemuuttujien välillä SMP-maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla. X_1 = maitoproteiinipitoisuus ja X_2 = massan vesipitoisuus.



Kuva 19. Weight plot -kuvaaja PLS-regressioanalyysillä määritetyistä korrelaatioista vastemuuttujien välillä Eila Sweet SMP -maitojauhetta sisältävillä ekstrudaateilla. X_1 = maitoproteiinipitoisuus ja X_2 = massan vesipitoisuus.

Split-plot-kokeet

Split-plot-kokeissa maitojauheet koodattiin dummy-muuttujiksi, jolloin kaikkien maitojauheiden tulokset yhdistettiin yhdeksi malliksi (liite 4). Dummy-muuttujia oli kaksi, jolloin SMP-maitojauhe sai arvon 0 molemmilla muuttujilla, ESMP-maitojauhe sai arvot 0 ja 1 ja ESSMP-maitojauhe arvot 1 ja 0. Näin ollen voitiin vertailla maitojauheiden välisiä eroavaisuuksia, mitä ei normaalilla MLR-analyysillä ilman dummy-muuttujien koodausta pystytty tekemään. Koejärjestyksessä maitoproteiinipitoisuus oli HTC ja vesipitoisuus ETC. Kokeisiin vaikuttavat tekijät lohkottiin osiin siten, että WP oli koepäivät (yhdeksän koepäivää) proteiinipitoisuuden ja maitojauheen (dummy-muuttujien) suhteen (kolme pitoisuutta ja kolme jauhetta). Massan vesipitoisuus (kolme pitoisuutta) oli SP. Split-plot-kokeiden malli on esitetty liitteessä 5. Vastemuuttujien mitatut ja mallin ennustamat arvot olivat lähellä toisiaan, jonka lisäksi jäännösarvot olivat satunnaisesti jakautuneet, joten mallin sovitus oli hyvä (liite 6).

Split-plot-kokeiden perusteella laktoosia sisältävät ekstrudaatit erosivat laktoosittomista ekstrudaateista ekspansion ja kovuuden suhteen (taulukko 12). Vesipitoisuudessa ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja, tosin SMP- ja ESSMP-maitojauheita sisältävien

ekstrudaattien välisen eron p-arvo oli 0,056, joten ero oli lähes merkitsevä. Ekstruusioajon aikaisessa vääntömomentissa ja paineessa ei havaittu eroja laktoosia sisältävän ja laktoosittomien maitojauheiden välillä. Laktoosittomien maitojauheiden (ESMP vs. ESSMP) kesken ekstrudaatit eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi minkään ominaisuuden suhteen. Sen sijaan ekstruusioajon aikainen paine suuttimella oli ESMP-maitojauheella suurempi kuin ESSMP-maitojauheella. Vääntömomentissa ei ollut eroja.

Taulukko 12. Split-plot-kokeen kiinteiden vaikutusten mallin ($y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4$) β -parametrien estimaatit (suluissa regressioparametrien keskivirheet) selittävälle muuttujille (maitoproteiinipitoisuus, massan vesipitoisuus ja maitojauheet) ja niiden vaikutus vastemuuttujiin.

	Vastemuuttujat				
	vesipitoisuus (%)	ekspansio (%)	kovuus (N/mm)	vääntömomentti (Nm)	paine (bar)
Vakiotermi	9,65*** (0,65)	142,1*** (11,9)	57,1*** (6,05)	25,9*** (1,20)	23,5*** (2,24)
X_1	0,6 (0,36)	-4,53 (6,65)	-0,66 (3,53)	1,12 (0,66)	-4,76*** (1,25)
X_2	1,60*** (0,12)	-18,6*** (2,40)	0,38 (2,18)	-2,08*** (0,19)	-5,57*** (0,42)
X_1X_2	-0,10 (0,14)	2,13 (2,94)	-4,76 (2,67)	0,62* (0,24)	0,91 (0,52)
X_1^2	-0,97 (0,52)	8,07 (11,3)	-0,51 (5,81)	1,04 (1,14)	2,33 (2,13)
X_2^2	0,29 (0,17)	-0,47 (3,60)	-1,41 (3,27)	0,1 (0,29)	0,31 (0,64)
X_3	1,43 (0,72)	-32,3* (13,2)	28,6*** (6,79)	-1,38 (1,32)	-3,75 (2,47)
X_4	1,06 (0,72)	-28,9*** (13,2)	22,9** (6,79)	-1,38 (1,32)	1,59 (2,47)
R^2	0,93	0,88	0,75	0,92	0,94
R^2 -adj.	0,92	0,85	0,69	0,90	0,93
σ^2 (WP)	0,84	15,2	6,79	1,56	2,87
RMSE / σ^2 (SP)	0,49	10,2	9,25	0,82	1,80
ESMP vs. ESSMP *	0,36 (0,72)	-3,41 (13,2)	5,62 (6,79)	0,0007 (1,32)	-5,34* (2,47)

X_1 = maitoproteiinipitoisuus, X_2 = massan vesipitoisuus, X_1^2 = neliöllinen vaikutus maitoproteiinipitoisuuteen, X_2^2 = neliöllinen vaikutus massan vesipitoisuuteen, X_1X_2 = yhdysvaikutus termi maitoproteiinipitoisuuteen ja massan vesipitoisuuteen, X_3 = SMP vs. ESSMP, X_4 = SMP vs. ESMP, R^2 = selitysaste, R^2 -adj. = korjattu selitysaste, RMSE = keskineliövirhe, σ^2 = virhevarianssi (WP wholeplot; SP subplot), * = laskettu mallilla, jossa ESMP sai dummy-muuttujilla arvot 0.

Maitoproteiinipitoisuus ei vaikuttanut ekstrudaattien ominaisuuksiin eikä ekstruusioajon aikaiseen vääntömomenttiin, mutta paineeseen sillä oli negatiivista vaikutusta (taulukko 12). Huomioitavaa on kuitenkin, että mallissa on yhdistetty kaikki maitojauheet, jolloin maitoproteiinipitoisuuden aiheuttamat vaikutukset ovat kumoutuneet, sillä maitoproteiinipitoisuudella oli MLR-analyysin mukaan positiivinen vaikutus laktoosia sisältävien ekstrudaattien ominaisuuksiin, mutta negatiivinen vaikutus laktoosittomien ekstrudaattien ominaisuuksiin. Massan vesipitoisuuden lisääminen lisäsi ekstrudaattien vesipitoisuutta, pienensi ekspansiota, mutta kovuuteen sillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta. Massan vesipitoisuuden lisääminen pienensi ekstruusioajon

aikaista vääntömomenttia ja painetta suuttimella. Vesipitoisuuden vaikutus oli näin ollen samanlainen split-plot-kokeissa kuin MLR-analyysissäkin, joten maitojauheilla ei ollut vaikutusta siihen, miten vesipitoisuus vaikutti ekstruusiassa.

Kaikkien vastemuuttujien korjattu selitysaste oli hyvä (taulukko 12). Keskineliövirheen neliöjuuri (engl. root-mean-square error, RMSE) oli suhteellisen pieni kaikilla vastemuuttujilla (noin 3–8 % vakiotermistä) paitsi kovuudella (16 % vakiotermistä). Virhevarianssit (Res. std. ja σ^2) olivat suuremmat päälohkojen kuin sivulohkojen osalta kaikissa muissa tapauksissa paitsi kovuudessa, joten split-plot-kokeiden tekeminen oli perusteltua sen sijaan, että oltaisiin tehty esimerkiksi täysin satunnaistettu MLR-analyysi.

3.3 Pohdinta

3.3.1 Maitojauheiden vertailu

Sokerikoostumuksen vaikutus ekstrudaatteihin

Laktoosia sisältävän maitojauheen (SMP) käyttämisellä saatiin split-plot-kokeiden, keskipistemittausten ja aistinvaraisen arvioinnin tulosten perusteella vähemmän kovia, enemmän ekspandoituneita ja huomattavasti vaaleampia ekstrudaatteja kuin laktoosittomilla maitojauheilla (ESMP ja ESSMP) ($p < 0,05$). Ekstrudaattien vesipitoisuudessa havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero keskipistemittauksissa, mutta ei split-plot-kokeissa, vaikkakin SMP- ja ESSMP-maitojauheiden välinen ero oli lähes merkitsevä (p-arvo 0,056).

Vääntömomentti kertoo ekstruusiomassaan kohdistuvista leikkausvoimista ja mekaanisesta työstä, ja vääntömomentin lisääntyessä usein ekspansio kasvaa ja kovuus vähenee (Yacu 2012). Paine suuttimella syntyy, kun ekstruusiomassa pakotetaan suuttimen aukon läpi tietyllä voimalla (Hsieh ym. 1993). Näin ollen massa, jonka viskositeetti on pieni, virtaa aukon läpi helpommin aiheuttaen pienemmän paineen suuttimella kuin massa, jonka viskositeetti on suurempi. Paineen kasvaessa ekstrudaattien ekspansio yleensä kasvaa ja vesipitoisuus pienenee, sillä paine-eron kasvaminen suuttimen ja ilmakehän välillä aiheuttaa veden voimakkaamman höyrystymisen massan tullessa ulos suuttimesta ja sen seurauksena myös suuremman ekspansio (Harper 1986). Tässä tutkimuksessa saadut tulokset ovat osittain linjassa kirjallisuuden kanssa, sillä laktoosia sisältävällä

jauheseoksella ekstruusioajon aikainen paine ja vääntömomentti korreloivat positiivisesti ekspansion kanssa, mutta laktoosittomilla jauheseoksilla ainoastaan paine korreloi selkeästi ekspansion kanssa. Vesipitoisuus korreloi negatiivisesti paineen kanssa kaikilla maitojauheseoksilla. Laktoosia sisältävän maitojauheen käyttämisellä vääntömomentti tai paine eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi laktoosittomista maitojauheista split-plot-kokeissa, mutta keskipistemittauksissa havaittiin eroja sekä vääntömomentissa että paineessa (vääntömomentissa ero ainoastaan ESMP-maitojauheeseen verrattuna).

Kaikissa ekstrudaateissa oli havaittavissa selkeää värinmuodostusta, mikä viittaisi Maillard-reaktioon ekstruusion aikana. Maillard-reaktiossa pelkistävät sokerit muodostavat kovalenttisia sidoksia proteiinien kanssa, minkä seurauksena massan fysikaalis-kemialliset ominaisuudet, kuten ulkonäkö, pintarakenne ja vedenpidätyskyky, voivat muuttua (Baier ja McClements 2001; Gu ym. 2009). Monosakkaridien (mm. glukoosi ja galaktoosi) on todettu muodostavan enemmän väriä kuin disakkaridien (mm. laktoosi) (Ames 1990), ja tässä työssä värinmuodostus olikin huomattavasti voimakkaampaa laktoosittomilla kuin laktoosia sisältävillä ekstrudaateilla.

Laktoosia sisältävien ja laktoosittomien ekstrudaattien väliset rakenne-erot saattoivat johtua myös sokereiden erilaisesta lasisiirtymälämpötilasta (T_g), ja glukoosilla ja galaktoosilla tiedetäänkin olevan huomattavasti matalampi T_g kuin laktoosilla (Roos 1993). Fanin ym. (1996) mukaan monosakkaridit plastisoivat maissipohjaista massaa enemmän kuin disakkaridit. Heidän mukaansa lasisiirtymälämpötilan laskiessa sulan massan viskositeetti pieneni, minkä seurauksena ekstrudaatit kutistuivat pienemmissä lämpötiloissa, jolloin niiden ekspansio pieneni ja kovuus lisääntyi. Viskositeetin pieneneminen vähensi myös spesifistä mekaanista energiaa (SME) ekstruusion aikana, minkä seurauksena tärkkelyksen liisteröityminen väheni. Tämän seurauksena ilmakuplien seinämien rakenne oheni, jolloin ilmakuplat puhkesivat helpommin, ja ekspansio jäi vähäisemmäksi.

Sokereiden aiheuttamat eroavaisuudet voivat myös liittyä proteiini-sokerigeelin erilaiseen vedenpidätyskykyyn, sillä glukoosin on todettu muodostavan soijaproteiinien kanssa vahvemman geelin kuin laktoosin (Gu ym. 2009). Vahvempi geeli mahdollisesti pidättää paremmin vettä massan tullessa ulos suuttimesta, jolloin ekspandoituminen on vähäisempää ja ekstrudaatti jää kovaksi.

Sokeripitoisuuden vaikutus ekstrudaatteihin

Enemmän sokeria sisältävää maitojauhetta (ESSMP) ja vähemmän sokeria sisältävää maitojauhetta (ESMP) sisältävien ekstrudaattien välillä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja minkään ominaisuuden suhteen split-plot-kokeissa tai aistinvaraisessa arvioinnissa. Keskipistemittauksissa ekstrudaattien ekspansio oli hieman suurempi ESSMP-maitojauheella. Paine suuttimella ekstruusioajon aikana oli pienempi ESSMP-maitojauheella ($p < 0,05$), mutta vääntömomentissa ei havaittu eroa split-plot-kokeissa. Keskipistemittauksissa tilanne oli taas päinvastainen, sillä paineessa ei havaittu eroa, mutta vääntömomentti oli suurempi ESSMP-maitojauheella ($p < 0,05$). Ekstrudaattien värissä oli silmämääräisesti havaittavissa myös jonkin verran eroja maitoproteiinipitoisuuksilla 10 ja 12 %.

Sokerin lisäämisen suurissa pitoisuuksissa (10–50 %) ja sokeripitoisuuden lisäämisen on todettu pienentävän ekstruusioajon aikaista vääntömomenttia ja painetta (Guerrero ym. 2012). Pieninä pitoisuuksina (6–8 %) sokerilla on kuitenkin todettu oleva positiivisia vaikutuksia riisi- ja maissipohjaisilla ekstrudaateilla (Hsieh ym. 1990; Sopade ja Le Grys 1991). Tässä työssä ESMP-maitojauhetta sisältävän seoksen sokeripitoisuus vaihteli välillä 5,6–8,4 % ja ESSMP-maitojauhetta sisältävän jauheseoksen sokeripitoisuus välillä ja 9,9–15,0 % (kokonaispainosta). Split-plot-kokeiden perusteella ekstruusioajon aikainen paine oli huomattavasti pienempi ESSMP-maitojauheella kuin ESMP-maitojauheella, mikä viittaisi siihen, että ekstruusiomassan viskositeetti on ollut pienempi. Sokeripitoisuuden lisäämisen on todettu alentavan massan viskositeettiä (Carvalho ja Mitchell 2000). Toisaalta, tässä työssä vääntömomentissa ei havaittu eroja maitojauheiden välillä, joten tulokset eroavat kirjallisuudesta, sillä viskositeetin pienentyessä vääntömomentin on todettu pienentyvän (Fan ym. 1996). Maitosokeripitoisuuden vaikutukset näyttäisivät riippuvan massan maitoproteiini- ja vesipitoisuudesta, sillä keskipistemittauksissa saatiin erilaisia tuloksia kuin split-plot-kokeissa.

Maitojauheiden funktionaaliset ominaisuudet ja niiden vaikutus ekstruusiossa

Maitojauheiden funktionaaliset ominaisuudet, joista ekstruusion kannalta todennäköisesti merkittävimpänä jauheen partikkelikoko, saattoivat osaltaan vaikuttaa ekstrudaattien ominaisuuksiin (Sharma ym. 2012). Myös maidon saamalla lämpökäsittelyllä on voinut olla vaikutusta, sillä lämpökäsittely vaikuttaa suoraan jauheen funktionaaliin

ominaisuuksiin. Partikkelikoon kasvattamisen on todettu pienentävän ekstrudaattien ekspansiota maissijauheilla (Garber ym. 1997; Zhang ja Hosney 1998; Onwulata ja Konstance 2006), mutta myös päinvastaisia tuloksia on saatu (Carvalho ym. 2010). Onwulata ja Konstance (2006) totesivat, että maissijauheen ja heraproteiinin (suhteessa 75:25) seoksella saatiin hyvälaatuisia ekstrudaatteja, kun partikkelikoko oli alle 300 µm.

Tässä tutkimuksessa ei mitattu jauheiden partikkelikokoja, mutta Kivimäen (2018) mukaan SMP-maitojauheen partikkelikoko oli 108 µm, Eila SMP -maitojauheen 178 µm ja Eila Sweet SMP -maitojauheen 93 µm. Vahamaisen maissitärkkelyksen partikkelikooksi on arvioitu alle 60 µm ja täysjyväkaurajauhon noin 100 µm (Nayouf ym. 2003; Syed 2012). Partikkelikoot ovat etenkin maissitärkkelyksen ja kaurajauhon osalta vain suuntaa antavia. Tässä tutkimuksessa käytettävät maitojauheet olivat kaikki kuivattu samalla menetelmällä, mutta SMP-maitojauhe oli saanut medium-heat-lämpökäsittelyn, kun taas ESMP ja ESSMP-maitojauheet olivat saaneet low-heat-lämpökäsittelyn. Tyypilliset käsittelylämpötilat ja -ajat medium-heat-lämpökäsittelylle on 85 °C/60 s ja low-heat-lämpökäsittelylle 70 °C/15 s (Sharma ym. 2012). Low-heat-lämpökäsittelyn etuina on jauheen hyvä liukoisuus, kun taas medium-heat-lämpökäsittelyssä jauheilla on hyvät vaahtoutumis- ja imeytymisominaisuudet. Maitojauheiden funktionaalisilla ominaisuuksilla on näin ollen saattanut olla jonkin verran vaikutusta ekstruusion kannalta, mutta huomioitavaa on, että maitojauheiden osuus koko jauheseoksesta oli vain noin 15–30 % (kuiva-aineesta).

3.3.2 Selittävien muuttujien vaikutus ekstruusiassa

Massan maitoproteiinipitoisuuden vaikutus

Maitoproteiinien vaikutukset vaihtelevat hyvin paljon ekstruusiassa, ja pienillä pitoisuuksilla ekstrudaattien ominaisuuksia voi olla mahdollista parantaa, mutta suuremmilla pitoisuuksilla vaikutukset ovat usein negatiivisia (Singh ym. 1991; Onwulata ym. 1998). Split-plot-kokeiden tuloksia ei voi pitää luotettavina maitoproteiinipitoisuuden osalta, sillä kaikki maitojauheet oli otettu mukaan malliin, jolloin niiden vaikutukset kumosivat toisensa. Tämän kappaleen tuloksia tarkastellaankin MLR-analyysissä saatujen tulosten perusteella. Maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä laktoosia sisältävien ekstrudaattien rakenne parani, mutta laktoosittomien ekstrudaattien rakenne heikkeni.

Maitoproteiinin ja proteiinipitoisuuden lisäämisellä on todettu olevan negatiivisia vaikutuksia ekstrudaattien ekspansioon ja kovuuteen useissa tutkimuksissa (Allen ym. 2007; Devi ym. 2013; Onwulata ym. 2014). Tässä tutkimuksessa negatiiviset vaikutukset olivatkin selkeästi havaittavissa, kun käytettiin laktoosittomia maitojauheita. Lisätyllä proteiinilla voi olla myös positiivisia vaikutuksia ekstruusiossa, sillä proteiinilisäyksen on todettu parantavan ohra- ja maissipohjaisten ekstrudaattien rakennetta (Peri ym. 1983; Kirjoranta ym. 2012). Tässä tutkimuksessa havaittiinkin positiivisia vaikutuksia, kun käytettiin laktoosia sisältävää maitojauhetta. Kirjoranta ym. (2012) arvelivat, että positiiviset vuorovaikutukset johtuivat proteiinien ja ohran sisältämien kuitujen yhteisvaikutuksesta. Tässä tutkimuksessa laktoosittomien ekstrudaattien ekspansion pieneneminen saattoi liittyä ekstruusiomassan pientyneeseen tärkkelyspitoisuuteen proteiinipitoisuuden lisääntyessä. Pientynyt ekspansio saattoi myös johtua lisääntyneistä proteiini-tärkkelysvuorovaikutuksista, sillä esimerkiksi Onwulata ym. (1998) totesivat, että lisääntyneet proteiini-tärkkelysvuorovaikutukset saattoivat lisätä ekstruusiomassan vedenpidätyskykyä, jolloin ekspansio jäi vähäisemmäksi. Tässä tutkimuksessa ekstruusiomassan vedenpidätyskyvyn lisääntymistä tukevat vesipitoisuusmittausten tulokset, joiden mukaan laktoosittomien ekstrudaattien vesipitoisuus lisääntyi maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä ($p < 0,01$).

Ekstrudaattien kovuuden ja ekspansion suhteen on usein negatiivinen korrelaatio (Peri ym. 1983; Allen ym. 2007). Tämän tutkimuksen tulokset eivät ole linjassa kirjallisuuden kanssa, sillä korrelaatiota ei juurikaan havaittu. Maitojauheet saattoivat vaikuttaa massan fysikaalis-kemiallisiin ominaisuuksiin esimerkiksi proteiini-proteiinivuorovaikutusten seurauksena. Singh ym. (1991) ovat todenneet, että lisääntyneiden proteiini-proteiinivuorovaikutusten seurauksena ekstruusiomassa voi ekspandoitua voimakkaasti, mutta ekstrudaatin rakenne voi kuitenkin jäädä suhteellisen kovaksi, koska proteiinifraktioit jäykistävät seinämien rakenteita. Tässä tutkimuksessa mallin selitysaste kovuuden suhteen ESMP-maitojauheella oli erittäin heikko ($R^2\text{-adj.} = -0,11$) ja SMP ($R^2\text{-adj} = 0,56$)- ja ESSMP ($R^2\text{-adj} = 0,43$)-maitojauheillakin suhteellisen heikko. Näin ollen massan vesi- ja maitoproteiinipitoisuudet eivät selittäneet kovinkaan hyvin kovuuden muutoksia, vaan jokin muu tekijä on vaikuttanut kovuuteen. Ekspansion suhteen ESMP-maitojauheella malli oli lisäksi puutteellinen ($p < 0,01$). Epäjohdonmukaiset tulokset voivat myös liittyä kovuusmittausten haastellisuuteen, sillä mittaustulos vaihteli huomattavan paljon ekstrudaattien epätasaisesta rakenteesta johtuen. Mittaustulosten käsittelyssä oli myös haasteita, sillä suoran sovittaminen kuvaajaan ei ollut aina täysin yksiselitteistä.

Maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä ekstruusion aikainen vääntömomentti kasvoi, kun jauheseos sisälsi SMP- tai ESSMP-maitojauheita, mutta ESMP-maitojauhetta käytettäessä vääntömomentti ei muuttunut tilastollisesti merkitsevästi. Paine suuttimella pieneni kaikilla maitojauheilla maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä. Maitoproteiinipitoisuuden lisääntyessä vääntömomentin ja paineen sekä ekstrudaattien välisten ominaisuuksien väliset korrelaatiot eivät näin ollen noudattaneet kirjallisuuden väitteitä, joiden mukaan vääntömomentin ja paineen lisääntyessä ekstrudaattien ominaisuudet paranevat (Singh ym. 2007; Yacu 2012). Tulokset eivät kuitenkaan ole yllättäviä, sillä maitoproteiinien vaikutuksista ekstruusio-olosuhteisiin ja ekstrudaattien ominaisuuksiin on saatu hyvin vaihtelevia tuloksia (Matthey ja Hanna 1997; Onwulata ym. 2001; Kirjoranta ym. 2012).

Tässä tutkimuksessa maitoproteiinipitoisuuden vaikutukset ekstrudaattien ominaisuuksiin ja vääntömomenttiin ja paineeseen suuttimella riippuivat hyvin vahvasti sokerikoostumuksesta ja osittain myös sokeripitoisuudesta. Tulokset viittaisivat siihen, että maitoproteiinit reagoivat laktoosin kanssa eri tavalla kuin glukoosin/galaktoosin. Laktoosin erilaiset vaikutukset lasisiirtymälämpötilaan ja Maillard-reaktion voimakkuuteen verrattuna glukoosiin/galaktoosiin saattavat selittää, miksi maitoproteiinipitoisuuden lisääntyminen vaikutti eri tavalla riippuen sokerista. Huomioitavaa on kuitenkin, että maitoproteiinin vaikutukset riippuvat hyvin vahvasti muista tekijöistä, joten tämänkin tutkimuksen tulokset saattaisivat olla erilaiset, kun esimerkiksi perusmassan reseptiä tai prosessointiparametrejä muutettaisiin.

Massan vesipitoisuuden vaikutus

Vedellä on tärkeä rooli ekstruusiassa sen lämmönsiirto-ominaisuuksien vuoksi, ja vesipitoisuuden lisäämisen on todettu pienentävän vääntömomenttia ja painetta suuttimella (Ryu ja Ng 2001; Stojceska ym. 2009; Guerrero ym. 2012). Vääntömomentilla ja paineella taas on merkittävä vaikutus lopputuotteen ominaisuuksiin, kuten vesipitoisuuteen, kovuuteen ja ekspansioon. Tässä tutkimuksessa vesipitoisuuden lisääminen pienensi vääntömomenttia ja painetta suuttimella kaikilla maitojauheilla, joten tulokset ovat linjassa kirjallisuuden kanssa. Vääntömomentti pieneni jonkin verran enemmän laktoosia sisältävällä jauheseoksella kuin laktoosittomilla jauheseoksilla.

Massan vesipitoisuuden ja ekstrudaattien vesipitoisuuden välillä oli oletetusti vahva positiivinen korrelaatio kaikilla maitojauheilla. Massan vesipitoisuudella oli jonkin verran

pienempi vaikutus laktoosia sisältävien ekstrudaattien vesipitoisuuteen kuin laktoosittomien ekstrudaattien vesipitoisuuteen.

Massan vesipitoisuudella ja ekstrudaattien ekspansiolla oli negatiivista korrelaatiota kaikilla käytetyillä maitojauheilla. Tulokset ovat linjassa useiden muiden ekstruusiitutkimusten kanssa (Fan ym. 1996; Onwulata ym. 2001; Guerrero ym. 2012; Kirjoranta ym. 2012). Ryu ja Ng (2001) totesivat, että vesipitoisuuden lisääntyessä massan viskositeetti pieneni, jolloin vesihöyryn haihtuessa massasta ilmakuplien kutistuminen ja romahtaminen lisääntyivät, mistä seurasi ekspansion pieneneminen ja kovuuden lisääntyminen. Tässä tutkimuksessa vesipitoisuuden lisääntyessä laktoosia sisältävien ekstrudaattien ekspansio pieneni jonkin verran enemmän kuin laktoosittomien ekstrudaattien.

Massan vesipitoisuus ei vaikuttanut ekstrudaattien kovuuteen millään maitojauheella. Tulos poikkeaa melko paljon kirjallisuudesta, sillä vesipitoisuuden lisäämisen on todettu lisäävän kovuutta useissa tutkimuksissa (Ding ym. 2006; Kirjoranta ym. 2012; Ryu ja Ng 2001). Epäjohdonmukaiset tulokset kovuudessa saattavat liittyä mallien heikkoon selityssasteeseen sekä kovuusmittausten haasteellisuuteen. Maitojauheet ovat saattaneet myös vaikuttaa siihen, miten vesi käyttäytyi ekstruusion aikana.

Käytetyllä maitojauheella näyttäisi olevan jonkin verran vaikutusta siihen, kuinka vesipitoisuus vaikuttaa vääntömomenttiin ja paineeseen suuttimella sekä ekstrudaattien ominaisuuksiin. Vesipitoisuuden lisäämisen aiheuttamat negatiiviset vaikutukset ovat suurempia laktoosia sisältävillä kuin laktoosittomilla ekstrudaateilla. Sokeri ja vesi ovat molemmat pehmentimiä, jolloin näiden lisääminen pehmentää ekstruusiomassaa alentaen sen viskositeettia, minkä seurauksena ekstruusion aikainen vääntömomentti ja paine suuttimella ja ekstrudaattien ominaisuudet muuttuvat (Fan ym. 1996). Laktoosin pehmentävä vaikutus on kuitenkin pienempi kuin glukoosin/galaktoosin sen korkeamman lasisiirtymälämpötilan johdosta. Näin ollen vesipitoisuuden lisääminen vaikuttaa enemmän laktoosia sisältävään ekstruusiomassaan kuin laktoosittomaan massa, koska vesipitoisuuden lisääntyessä sokereiden aiheuttamat negatiiviset vaikutukset pienenevät enemmän glukoosia/galaktoosia sisältävässä ekstruusiomassassa.

Tämän ja useiden muiden tutkimusten mukaan massan vesipitoisuuden vaikutus ekstruusiossa näyttäisi olevan muista tekijöistä, kuten perusmassan koostumuksesta,

lisätystä proteiinista ja prosessointiparametreista melko riippumaton, toisin kuin maitoproteiinipitoisuus, johon muut tekijät vaikuttavat voimakkaasti (Onwulata ym. 2001; Ding ym. 2006; Guerrero ym. 2012; Kirjoranta ym. 2012). Tässä tutkimuksessa MLR- ja split-plot-kokeiden yhtenevät tulokset vesipitoisuuden suhteen viittaavat siihen, että vesipitoisuuden vaikutukset olivat maitojauheista riippumattomia. Näin ollen vesipitoisuuden vaikutuksista ekstruusiassa voidaan tehdä melko luotettavia ja yleispäteviä päätelmiä, toisin kuin maitoproteiinipitoisuuden vaikutuksista. Vesipitoisuudella vaikuttaisi myös olevan suurempi vaikutus vääntömomenttiin ja paineeseen suuttimella ja ekstrudaattien ominaisuuksiin kuin maitoproteiinipitoisuudella.

4 PÄÄTELMÄT

Tutkimuksen perusteella sekä laktoosia sisältävän että laktoosittoman maitojauheen käyttämisellä on mahdollista saada hyvälaatuisia ekstruusiotuotteita, sillä sekä laktoosia sisältävän maitojauheen (SMP) että laktoosittomien maitojauheiden (Eila SMP ja Eila Sweet SMP) käyttämisellä saatiin rakennemittausten ja aistinvaraisen arvioinnin perusteella ekspandoituneita ja ei liian kovia ekstrudaatteja. Maitosokeripitoisuuden alentamisella noin 60 %:iin kuiva-aineesta (Eila SMP vs. Eila Sweet SMP) ei ollut merkittävää vaikutusta ekstrudaattien rakenteeseen tai aistinvaraiseen laatuun, joten laktoositonta maitojauhetta sisältävien ekstrudaattien sokeripitoisuutta saattaa olla mahdollista pienentää jonkin verran ilman, että ekstrudaattien laatu heikkenee merkittävästi. Laktoosia sisältävä maitojauhe saattaa kuitenkin olla jonkin verran parempi vaihtoehto ekstruusiassa verrattuna laktoosittomaan maitojauheeseen, sillä laktoosia sisältävän maitojauheen käyttämisellä saatiin ekspandoituneempia ja vähemmän kovia ekstrudaatteja kuin laktoosittomilla maitojauheilla. Lisäksi laktoosia sisältävää maitojauhetta voidaan mahdollisesti lisätä suurempia määriä kuin laktoositonta maitojauhetta ilman, että ekstrudaatin rakenne heikkenee merkittävästi, sillä laktoosia sisältävien ekstrudaattien rakenne parani maitoproteiinipitoisuuden (8, 10 ja 12 % kuiva-aineesta) kasvaessa, kun taas laktoosittomilla ekstrudaateilla tilanne oli päinvastainen.

Maitoproteiinipitoisuuden vaikutukset näyttäisivät täten riippuvan hyvin vahvasti käytetystä maitojauheesta, ja laktoosia sisältävän maitojauheen käyttämisellä maitoproteiinipitoisuuden lisääminen saattaa parantaa ekstrudaattien rakennetta, kun taas laktoosittomalla maitojauheella tilanne voi olla päinvastainen. Tämän ja useiden muiden tutkimusten mukaan maitoproteiinien vaikutukset näyttäisivät olevan vahvasti muista tekijöistä riippuvaisia, joten perusmassan reseptiikalla ja prosessointiparametrien (mm. ruuvien pyörimisnopeus, massan syöttönopeus ja lämpötilaprofiili) valinnalla voidaan todennäköisesti vaikuttaa huomattavasti maitojauhetta sisältävän ekstrudaatin laatuun. Vesipitoisuuden vaikutukset näyttäisivät olevan maitojauheesta riippumattomia, sillä kaikilla käytetyillä maitojauheilla vesipitoisuuden lisääntyessä (14, 16 ja 18 %) ekstrudaattien rakenne heikkeni. Vesipitoisuus vaikutti enemmän ekstrudaattien rakenteeseen kuin maitoproteiinipitoisuus, joten vesipitoisuuden vaikutukset näyttäisivät olevan merkittävämpiä kuin maitoproteiinipitoisuuden vaikutukset.

Perusmassan koostumuksella näyttäisi olevan merkittävä vaikutus ekstrudaattien laadun kannalta, sillä esikokeissa vahamaisen maissitärkkelyksen lisäämisellä perusmassaan (30 % maissitärkkelystä ja 70 % kaurajauhoa kuiva-aineesta) saatiin parannettua ekstrudaattien rakennetta huomattavasti. Lisäksi maitojauheiden funktionaalisilla ominaisuuksilla (mm. partikkelikoko ja lämpökäsittely) saattaa olla vaikutusta ekstrudaattien rakenteen kannalta.

Tutkimuksen hypoteesi piti suurilta osin paikkansa, sillä laktoosia sisältävät ekstrudaatit olivat ekspandoituneempia ja vähemmän kovia kuin laktoosittomat ekstrudaatit. Maitoproteiinipitoisuuden suhteen hypoteesi piti osittain paikkansa, sillä maitoproteiinipitoisuuden lisääminen pienensi ekstrudaattien ekspansiota ja lisäsi kovuutta laktoosittomilla ekstrudaateilla, mutta laktoosia sisältävillä ekstrudaateilla vaikutus oli kuitenkin päinvastainen.

Lopuksi todettakoon, että ekstruusio on hyvin monikäyttöinen ja toimintatavaltaan melko yksinkertainen menetelmä. Ekstruusiosprosessi vaatii kuitenkin huomattavan paljon optimointia, jotta lopullinen tuote on laadultaan hyvä, ja käyttäjän onkin tiedostettava ekstruusiossa vaikuttavat merkittävimmät tekijät. Ennen ekstruusion aloittamista on erityisen tärkeää suunnitella oikeanlainen koesuunnitelma, sillä oikean koesuunnitelman valinnalla voidaan minimoida kokeiden määrä, ja toisaalta saada tarpeeksi dataa, jotta saadut tulokset ovat luotettavia. Ekstruusiossa voidaan käyttää hyvin erilaisia raaka-aineita, ja ekstrudaattien ravitsemuksellista ja mahdollisesti myös rakenteellista laatua voidaankin parantaa esimerkiksi runsaasti hyvälaatuisia proteiineja sisältävän maitojauheen lisäämisellä. Tällöin on kuitenkin erittäin tärkeää suunnitella oikeanlainen resepti, ja optimoida prosessiolosuhteet kyseiselle reseptille sopivaksi. Tutkimusten ja tiedon lisääntyessä maitojauheita saatetaankin tulevaisuudessa hyödyntää huomattavasti laajemmin erilaisissa ekstruusiotuotteissa.

LÄHDELUETTELO

- Ali Z, Bhaskar SB. 2016. Basic statistical tools in research and data analysis. *Indian Journal of Anaesthesia* 60(9):54–61.
- Allen KR, Carpenter CE, Walsh MK. 2007. Influence of protein level and starch type on an extrusion-expanded whey product. *Int J Food Sci Technol* 42:953–960.
- Ames JM. 1990. Control of Maillard reaction on food systems. *Trends Food Sci Technol* 1:150–154.
- Baier S, McClements DJ. 2001. Impact of preferential interactions on thermal stability and gelation of bovine serum albumin in aqueous sucrose solutions. *J Agric Food Chem* 49:2600–2608.
- Baldwin EA, Hagenmaier RD. 2012. Introduction. Teoksessa: Baldwin EA, Hagenmaier R, Bai J, toim. *Edible coatings and films to improve food quality*. 2.p. Florida, Yhdysvallat: CRC Press. s 1–13.
- Banach JC, Clark S, Lamsal BP. 2016. Instrumental and sensory texture attributes of high-protein nutrition bars formulated with extruded milk protein concentrate. *J Food Sci* 81(5):1254–1262.
- Barroca MJ. 2014. Breakfast cereals. Teoksessa: Guiné RPF, Correia PMR, toim. *Engineering aspects of cereal and cereal-based products*. 1. p. Florida, Yhdysvallat: CRC Press. s 201–209.
- Berglund PT, Fastnaught CE, Holm ET. 1994. Physicochemical and sensory evaluation of extruded high-fiber barley cereals. *Cereal Chem* 71(1):91–95.
- Björck I, Nyman M, Asp NG. 1984. Extrusion cooking and dietary fiber: effects on dietary fiber content and on degradation in the rat intestinal tract. *Cereal Chem* 61:174–179.
- Bouvier JM, Campanella OH. 2014. Extrusion equipment. Teoksessa: Bouvier JM, Campanella OH, toim. *Extrusion processing technology: food and non-food biomaterials*. 1.p. Lontoo, Iso-Britannia: John Wiley & Sons. s 13–51.
- Brands CMJ, van Boekel MAJS. 2001. Reactions of monosaccharides during heating of sugar-casein systems: building of a reaction network model. *J Agric Food Chem* 49:4667–4675.
- Brennan MA, Derbyshire E, Tiwari BK, Brennan CS. 2013. Ready-to-eat snack products: the role of extrusion technology in developing consumer acceptable and nutritious snacks. *Int J Food Sci Technol* 48:893–902.
- Carpin M, Bertelsen H, Bech JK, Jeantet R, Risbo J, Schuck P. 2016. Caking of lactose: A critical review. *Trends Food Sci Technol* 53:1–12.
- Chen J, Serafin FL, Pandya RN, Daun H. 1991. Effects of extrusion conditions on sensory properties of corn meal extrudates. *J Food Sci* 56(1):84–89.
- Carvalho CWP, Mitchell JR. 2000. Effect of sugar on the extrusion of maize grits and wheat flour. *Int J Food Sci Technol* 35:569–576.
- Carvalho CWP, Takeiti CY, Onwulata CI, Pordesimo LO. 2010. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. *J Food Eng* 98:103–109.
- D’Appolonia BL. 1972. Effect of bread ingredients on starch-gelatinization properties as measured by the amylograph. *Cereal Chem* 49:532–543.
- Day L, Swanson BG. 2013. Functionality of protein-fortified extrudates. *Compr Rev Food Sci Food Saf* (12):546–564.
- Devi NL, Shobha S, Tang X, Shaur SA, Dogan H, Alavi S. 2013. Development of protein-rich sorghum-based expanded snacks using extrusion technology. *Int J Food Prop* 16:263–276.

Ding Q-B, Ainsworth P, Plunkett A, Tucker G, Marson H. 2006. The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. *J Food Eng* 73:142–148.

[EU] Euroopan komission asetus (EU) No 1048/2012. 2012. Saatavilla: https://ec.europa.eu/food/safety/labelling_nutrition/claims/nutrition_claims_en. Tulostettu 21.2.2019.

Fan J, Mitchell JR, Blanshard JMV. 1996. The effect of sugars on the extrusion of maize grits:I. The role of the glass transition in determining product density and shape. *Int J Food Sci Technol* 31:55–65.

[FAO] Yhdistyneiden kansakuntien elintarvike- ja maatalousjärjestö. 2018. World food situation. Saatavilla: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>. Tulostettu 9.6.2018.

Fellows PJ. 2000. Food processing technology: Principles and practice. 2. p. Gambridge, Englanti: Woodhead. 592 s.

Fernandez E, Schebor C, Chirife J. 2003. Glass transition temperature of regular and lactose hydrolysed milk powders. *Food Sci Technol* 36:547–551.

Foster KD. 2002. The prediction of sticking in dairy powders [väitöskirja]. Massey Yliopisto, Uusi-Seelanti.

[FSD] Tietoarkisto. 2002a. Varianssianalyysi. Saatavilla: <https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/varianssi/anova.html>. Tulostettu 8.3.2019.

[FSD] Tietoarkisto. 2002b. Regressioanalyysi. Saatavilla: <https://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/regressio/analyysi.html>. Tulostettu 8.3.2019.

Garber BW, Hsieh F, Huff HE. 1997. Influence of particle size on the twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chem* 74(5):656–661.

Gu X, Campbell LJ, Euston SR. 2009. Influence of sugars on the characteristics of glucono- δ -lactone-induced soy protein isolate gels. *Food Hydrocoll* 23:314–326.

Gualberto DG, Bergman CJ, Kazemzadeh M, Weber CW. 1997. Effect of extrusion processing on the soluble and insoluble fiber, and phytic acid contents of cereal brans. *Plant Foods Hum Nutr* (51): 187–198.

Guerrero P, Beatty E, Kerry JP, de la Caba K. 2011. Extrusion of soy protein with gelatin and sugars at low moisture content. *J Food Eng* 110:53–59.

Guy R. 2001. Raw materials for extrusion cooking. Teoksessa: Guy R, toim. Extrusion cooking – technologies and applications. 1. p. Gambridge, Iso-Britannia: Woodhead. s 1–28.

Guy RCE. 1994. Raw materials for extrusion cooking processes. Teoksessa: Frame ND, toim. The technology of extrusion cooking. 1.p. Glasgow, Iso-Britannia: Springer. s 52–72.

Hardy MA. 1993. Introduction. Teoksessa Hardy MA, toim. Regression with dummy variables. 1.p. Kalifornia, Yhdysvallat: Sage Publications. s 2–7.

Harper 1986. Extrusion texturization of foods. *Food Tech* 40:70–73. Viite julkaisusta: Ganjyal GM, Hanna MA. 2004. Effects of extruder die nozzle dimensions on expansion and micrographic characterization during extrusion of acetylated starch. *Starch* 56:108–117.

Hsieh F, Grenus KM, Hu L, Huff HE. 1993. Twin-screw extrusion of rice flour with salt and sugar. *Cereal Chem* 70(5):493–498.

Hsieh F, Peng IC, Huff HE. 1990. Effects of salt, sugar and screw speed on processing and product variables of corn meal extruded with a twin-screw extruder. *J Food Sci* 55(1):224–227.

İbanoğlu S, Ainsworth P, Özer EA, Plunkett A. 2006. Physical and sensory evaluation of a nutritionally balanced gluten-free extruded snack. *J Food Eng* 75:469–472.

Jin Z, Hsieh F, Huff HE. 1994. Extrusion cooking of corn meal with soy fiber, salt, and sugar. *Cereal Chem* 71(3):227–234.

- Jones B, Nachtsheim CJ. 2009. Split-plot designs: what, why, and how. *J Qual Technol* 41(4):340–361.
- Jouppila K, Roos Y. 1994. Glass transition and crystallization in milk powder. *J Dairy Sci* 77:2907–2915.
- Kalichevsky MT, Jaroszkiewicz EM, Blanshard JMV. 1992. Glass transition of gluten. 1: Gluten and gluten-sugar mixtures. In *J Biol Macromol* 14:257–266.
- Karkle EL, Alavi S, Dogan H. 2012. Cellular architecture and its relationship with mechanical properties in expanded extrudates containing apple pomace. *Food Res Int* 46:10–21.
- Kasarda DD. 2013. Can an increase in celiac disease be attributed to an increase in the gluten content of wheat as a consequence of wheat breeding? *J Agric Food Chem* 61:1155–1159.
- Kervinen R. 1981. Effects of certain minor ingredients on extrusion cooking of wheat [pro gradu -tutkielma]. Helsinki. Helsingin yliopisto, elintarviketeknologiaan laitos. Viite julkaisusta: Hsieh F, Peng IC, Huff HE. 1990. Effects of salt, sugar and screw speed on processing and product variables of corn meal extruded with a twin-screw extruder. *J Food Sci* 55(1):224–227.
- Kirby AR, Ollet AL, Parker R, Smith AC. 1988. An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion-cooking of maize grits. *J Food Eng* 8:247–272.
- Kirjoranta S, Solala K, Suuronen JP, Penttilä P, Peura M, Serimaa R, Tenkanen M, Jouppila K. 2012. Effects of process variables and addition of polydextrose and whey protein isolate on the properties of barley extrudates. *J Food Sci Technol* 47:1165–1175.
- Kivimäki J. 2018. Maitojauheiden hyödyntäminen makeissa täytteissä [pro gradu -tutkielma]. Helsinki. Helsingin yliopisto, elintarviketeknologiaan laitos.
- Kowalski SM, Potcner KJ. 2003. How to recognize a split-plot experiment. *Qual Prog* 36(11):60–66.
- Kumar L, Brennan M, Mason S, Zheng H, Brennan C. 2016. Rheological, pasting and microstructural studies of dairy protein–starch interactions and their application in extrusion-based products: A review. *Starch* 69:1–11.
- Le Corre. 2006. Ready-to-eat breakfast cereal manufacturing: use of twin-screw extrusion technology to produce multiple products. *Cereal Foods World* 51(6):302–305.
- Matthey FP ja Hanna M.A. 1997. Physical and functional properties of twin-screw extruded whey protein concentrate-corn starch blends. *Lebensm Wiss u Technol* 30:359–366.
- McHugh TH, Avena-Bustillos RJ. 2012. Applications of edible films and coatings to processed foods. Teoksessa: Baldwin EA, Hagenmaier R, Bai J, toim. *Edible coatings and films to improve food quality*. 2.p. Florida, Yhdysvallat: CRC Press. s 291–319.
- Menon R, Gonzalez T, Ferruzzi M, Jackson E, Winderl D, Watson J. 2016. Oats – From Farm to Fork. *Adv Food Nutr Res* 77:1–55.
- Meuser F. 2001. Technological aspects of dietary fibre. Teoksessa: McCleary BV, Proky L, toim. *Advanced dietary fibre technology*. 1.p. Oxford, Iso-Britannia: Blackwell Science Ltd. s 259–266.
- Morrissey PA. 1985. Lactose: Chemical and physico-chemical properties of lactose. Teoksessa: Fox PF, toim. *Developments in dairy chemistry-3*. 1.p. Cork, Irlanti: Springer. s 1–34.
- Mościcki L, Zuilichem DJ. 2011. Extrusion-cooking and related technique. Teoksessa: Mościcki L, toim. *Extrusion-Cooking Techniques: Applications, theory and sustainability*. 1.p. Weinham, Saksa: Wiley-VCH. s. 1–24.
- [MTK] Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto. 2017. Viljojen ja öljykasvien tuotanto. Saatavilla: https://www.mtk.fi/maatalous/maatalous_suomessa/viljojen_oljykasvien_tuotanto/fi_FI/vilja_ja_oljykasvitila/t/. Tulostettu 8.6.2018.

- Moskowitz H. 1970. Ratio scales of sugar sweetness. *Atten Percept Psychophys* 7(5):315–320.
- Mottaz J, Bruyas L. 2001. Optimised thermal performance in extrusion. Teoksessa: Guy R, toim. *Extrusion Cooking – Technologies and Applications*. 1. p. Gambridge, Iso-Britannia: Woodhead. s. 51–82.
- Nayak BK, Hazra A. 2019. How to choose the right statistical test? *Indian J Ophththalmol* 59(2).
- Nayouf M, Loisel C, Doublier JL. 2003. Effect of thermomechanical treatment on the rheological properties of crosslinked waxy corn starch. *J Food Eng* 59:209–219.
- Nutrientsreview. 2016. Sweeteners. Saatavilla: <http://www.nutrientsreview.com/articles/sweeteners.html>. Tulostettu 10.6.2018.
- Obradović V, Babić J, Subarić D, Ackar D, Jozinović A. 2014. Improvement of nutritional and functional properties of extruded food products. *J Food Nutr Res* 53 (3):189–206.
- Onwulata CI. 2012. Thermal and nonthermal extrusion of protein products. Teoksessa: Maskan M, Altan A, toim. *Advances in food extrusion technology*. 1.p. Florida, Yhdysvallat: CRC Press. s 275–296.
- Onwulata CI, Konstance RP. 2006. Extruded corn meal and whey protein concentrate: Effect of particle size. *J Food Process Pres* 30:475–487.
- Onwulata CI, Konstance RP, Smith PW, Holsinger VH. 1998. Physical properties of extruded products as affected by cheese whey. *J Food Sci* 63(5):1–5.
- Onwulata CI, Smith PW, Konstance RP, Holsinger VH. 2001. Incorporation of whey products in extruded corn, potato or rice snacks. *Food Res Int* 34(8):679–687.
- Onwulata CI, Tunick MH, Thomas-Gahring AE. 2014. Pasting and extrusion properties of mixed carbohydrate and whey protein isolate matrices. *J Food Process Preserv* 38:1577–1591.
- Ortega-Rivas E. 2005. Handling and processing of food powders and particulates. Teoksessa: Onwulata C, toim. *Encapsulated and powdered foods*. 1.p. Florida, Yhdysvallat: CRC Taylor & Francis. s 75–144.
- Pavlati AE, Orts W. 2009. Edible films and coatings: why, what, and how? Teoksessa: Embuscado ME, Huber KC, toim. *Edible films and coatings for food applications*. 1.p. New York, Yhdysvallat: Springer-Verlag. s. 1–23.
- Peri C, Barbieri R, Casiraghi EM. 1983. Physical, chemical and nutritional quality of extruded corn germ flour and milk protein blends. *J Food Technol* 18:43–52.
- Pitts KF, Favaro J, Austin P, Day L. 2014. Co-effect of salt and sugar on extrusion processing, rheology, structure and fracture mechanical properties of wheat–corn blend. *J Food Eng* 127:58–66.
- Poutanen K, Lyly M, Juvonen K, Karhunen L. 2010. Rye, oats, and weight management. *Cereal Foods World* 55(2):66–69.
- Robin F, Schuchmann HP, Palzer S. 2012. Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends Food Sci Technol* 28:23–32.
- Roininen K, Heiniö RL, Vehkalahti K. 2008. Kuvailevat menetelmät. Teoksessa: Tuorila H, Appelby U, toim. *Elintarvikkeiden aistinvaraiset tutkimusmenetelmät*. 2.p. Helsinki: Gaudeamus s. 93; 96–99.
- Roos Y. 1993. Melting and glass transitions of low molecular weight carbohydrates. *Carbohydr Res* 238: 39–48.
- Roos Y, Karel M. 1991. Phase transitions of mixtures of amorphous polysaccharides and sugars. *Biotechnol Prog* 7:49–53.
- Ruokavirasto. 2019. Proteiinin lähde. Saatavilla: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elintarvikkeala/valmistus/elintarvikkeista-annettavat-tiedot/ravitsemus--ja-terveysvaitteet/ravitsemusvaitteet/proteiinin-lahde/>. Tulostettu 4.3.2019.

Ryu G.H, Ng P.K.W. 2001. Effects of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheatflour and whole cornmeal extrudates. *Starch* 53:147–154.

Samuel L. 2012. How does lactose affect gastrointestinal function? Interactive biology. Saatavilla: <http://www.interactive-biology.com/4025/how-lactose-affects-gi-function/>. Tulostettu 6.3.2019.

Sauvaget F, Blond G. 1991. Effect of water activity on crispness of breakfast cereals. *J Texture Stud* 22:423–442.

Seigle RL, Nash MA. 2011. Nephrology. Teoksessa: Polin RA, Ditmar MF, toim. *Pediatric secrets*. 5.p. Mosby. s 480–523.

Seker M. 2012. Extrusion of snacks, breakfast cereals, and confectioneries. Teoksessa Maskan M ja Altan A, toim. *Advances in food extrusion technology*. 1.p. Florida, Yhdysvallat: Cornwall CRC Press. s 169–209.

Sharma A, Jana AH, Chavan RS. 2012. Functionality of milk powders and milk-based powders for end use applications—a review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 11:518–528.

Shrestha AK, Howes T, Adhikari BP, Bhandari BR. 2007. Water sorption and glass transition properties of spray dried lactose hydrolysed skim milk powders. *LWT - Food Sci Technol* 40:1593–1600.

Sibakov JK, Kirjoranta SJ, Alam SA, Kokkonen H, Jurvelin JS, Jouppila K, Poutanen KS, Sozer N. 2015. Effect of oat bran fractions on extrudates made of defatted oats. *Food Bioprocess Technol* 8:445–458.

Singh RK, Nielsen SS, Chambers JV, Martinez-Serna M, Villota R. 1991. Selected characteristics of extruded blends of milk protein raffinates or nonfat dry milk with corn flour. *J Food Process Preserv* 4:285–302.

Singh S, Gamlat S, Wakeling L. 2007. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *Int J Food Sci Technol* 42:619–629.

Smith K. 2008. *Dried Dairy Ingredients*. Wisconsin Center for Dairy Research. 60 s.

Solís-Morales D, Sáenz-Hernández C.M, Ortega-Rivas E. 2009. Attrition reduction and quality improvement of coated puffed wheat by fluidised bed technology. *J Food Eng* 93:236–341.

Sopade PA, Le Grys GA. 1991. Effect of added sucrose on extrusion cooking of maize starch. *Food Control* 4:103–109.

Stojceska V, Ainsworth P, Plunkett A, İbanoğlu S. 2009. The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products. *Food Chem* 114:226–232.

Syed AA. 2012. Effects of extrusion process variables on the physical properties of oat-containing extrudates [pro gradu -tutkielma]. EKT-sarja 1548. Helsinki. Helsingin yliopisto, Elintarviketeknologian laitos. 77 s. Saatavilla: <http://hdl.handle.net/10138/153949>.

Tester RF, Karkalas J. 2003. Carbohydrates – classification and properties. Teoksessa: Caballero B, Finglas P, Toldra F, toim. *Encyclopedia of food sciences and nutrition*. 2.p. Glasgow, UK: Academic Press. s 862–875.

Trajkowski V. How to select appropriate statistical test in scientific articles. *J Spec Educ Rehab* 17(3–4):5–28.

Tuorila H, Appelbye U. 2008. Mielty mysten ja hyväksyttävyyden mittaaminen. Teoksessa: Tuorila H, Appelbye U, toim. *Elintarvikkeiden aistinvaraiset tutkimusmenetelmät*. 3.p. Helsinki, Suomi: Gaudeamus. s. 205–209.

[USDA] Yhdysvaltain maatalousministeriö. 2018. World agriculture supply and demand estimates. Saatavilla: https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/Secretary_Briefing.pdf. Tulostettu 8.6.2018.

- Valio. 2016. The properties and advantages of the Valio Eila® lactose free range. Saatavilla: <https://www.valio.com/articles/the-properties-and-advantages-of-the-valio-eila-lactose-free-range/>. Tulostettu 10.2.2019.
- Vaz LCMA, Areas JAG. 2010. Recovery and upgrading bovine rumen protein by extrusion: effect of lipid content on protein disulphide cross-linking, solubility and molecular weight. *Meat Sci* 84:39–45.
- Visakh PM. 2014. Starch-based bionanocomposites: processing and properties polysaccharide building blocks: A sustainable approach to the development of renewable biomaterials, first edition. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/260165685_starch-based_bionanocomposites_processing_and_properties_polysaccharide_building_blocks_a_sustainable_approach_to_the_development_of_renewable_biomaterials_first_edition_edited_by. Tulostettu 11.3.2019.
- Walsh MK, Wood AM. 2010. Properties of extrusion-expanded whey protein products containing fiber. *Int J Food Prop* 13:702–712.
- Wang W-M, Klopfenstein CF, Ponte JG. 1993. Effects of twinscrew extrusion on the physical properties of dietary fibre and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of wheat bran. *Cereal Chem* 70:707–711.
- Winters R, Winters A, Amedee RG. 2010. Statistics: A brief overview. *Ochsner J* 10:213–216.
- Yacu WA. 2012. Extruder selection, design, and operation for different food applications. Teoksessa: Maskan M ja Altan A, toim. *Advances in food extrusion technology*. 1.p. Florida, Yhdysvallat: Cornwall CRC Press. s 23–69.
- Yağci S, Göğüs F. 2012. Quality control parameters of extrudates and methods for determination. Teoksessa Maskan M, Altan A, toim. *Advances in food extrusion technology*. 1.p. Florida, Yhdysvallat: Cornwall CRC Press. s 297–322.
- Yanniotis S, Petraki A, Soumpasi E. 2007. Effect of pectin and wheat fibers on quality attributes of extruded cornstarch. *J Food Eng* 80:594–599.
- Yao N, White PJ, Alavi S. 2011. Impact of β -glucan and other oat flour components on physico-chemical and sensory properties of extruded oat cereals. *Food Sci Technol Int* 46:651–660.
- Zhang W, Hosney RC. 1998. Factors affecting expansion of corn meals with poor and good expansion properties. *Cereal Chem* 75:639–643.
- Zuilichem DJV, Janssen LPBM, Mościcki L. 2011. Engineering aspects of extrusion. Teoksessa: Mościcki L, toim. *Extrusion-cooking techniques: Applications, theory and sustainability*. 1.p. Weinham, Saksa: Wiley-VCH. s 25–43.

Liite 1. Maitojauheiden erot aistinvaraisessa arvioinnissa (tummennettu lukuarvo tarkoittaa, että näytteiden välillä on tilastollisesti merkitsevä ero).

Vertailu		p-arvo						
näyte	näyte	väri	paksuus	haju	kovuus	tiiveys	paahteisuus	makeus
ESSMP 18 %	ESMP 18 %	0,865	0,999	0,978	0,979	0,774	0,921	0,977
ESSMP 18 %	ESSMP 14 %	0,001**	0,023*	0,782	0,385	0,899	0,025*	0,999
ESSMP 18 %	SMP 18 %	0,005**	0,046*	0,421	0,026*	0,498	0,096	0,278
ESSMP 18 %	ESMP 14 %	0,004**	0,569	0,903	0,239	0,562	0,063	0,697
ESSMP 18 %	SMP 14 %	0,025*	0,000***	0,786	0,013*	0,226	0,206	0,145
ESMP 18 %	ESSMP 14 %	0,000***	0,019*	0,324	0,956	0,972	0,002**	0,882
ESMP 18 %	SMP 18 %	0,002**	0,039*	0,254	0,082	0,029*	0,504	0,697
ESMP 18 %	ESMP 14 %	0,000***	0,418	0,184	0,636	0,999	0,006**	0,278
ESMP 18 %	SMP 14 %	0,010*	0,000***	0,906	0,056	0,015*	0,743	0,473
ESSMP 14 %	SMP 18 %	0,000***	1,000	0,082	0,002**	0,001**	0,000***	0,145
ESSMP 14 %	ESMP 14 %	0,576	0,302	0,985	0,887	0,712	0,999	0,882
ESSMP 14 %	SMP 14 %	0,000***	0,029*	0,171	0,004**	0,000***	0,000***	0,068
SMP 18 %	ESMP 14 %	0,000***	0,342	0,008**	0,014*	0,003**	0,000***	0,012*
SMP 18 %	SMP 14 %	0,015*	0,069	0,406	0,958	0,391	0,999	0,999
ESMP 14 %	SMP 14 %	0,000***	0,003**	0,034*	0,015*	0,002**	0,000***	0,005**

Tilastollisesti merkitsevä jos, *p < 0,05; **p < 0,01; ***p < 0,001.

Liite 2. Ekstruusioajojen ja ekstrudaattien mittaustulokset.

nro	näyte	Selittävät muuttujat			Vastemuuttujat			
		todelliset arvot			keskiarvot ja -hajonnat			
		massan maitoproteiini- nipitoisuus (%)	massan vesipitoi- suus (%)	ekstrudaa- tin vesipitoi- suus (%)	ekspansio (%)	kovuus (N/mm)	vääntö- momentti (Nm)	paine (bar)
1		8	14	7,3 ± 0,1	148,0 ± 10,9	58,8 ± 10,0	29,0 ± 1,1	42,2 ± 7,1
2	ESMP	8	16	8,0 ± 0,1	164,2 ± 7,6	79,2 ± 31,5	26,0 ± 0,9	38,4 ± 6,6
3		8	18	10,2 ± 0,1	113,4 ± 7,1	106,7 ± 17,9	23,9 ± 0,5	24,8 ± 5,0
4		10	14	9,8 ± 0,3	115,2 ± 14,9	95,4 ± 19,0	24,2 ± 1,6	28,4 ± 6,3
5		10	16	10,9 ± 0,4	100,4 ± 7,7	69,7 ± 28,0	23,3 ± 1,2	22,6 ± 5,2
6	ESMP	10	16	11,1 ± 0,3	101,4 ± 11,6	74,2 ± 20,9	23,5 ± 1,3	22,7 ± 5,0
7		10	16	10,5 ± 0,1	105,8 ± 7,3	91,7 ± 25,5	22,9 ± 1,1	23,8 ± 4,8
8		10	16	11,4 ± 0,5	102,0 ± 10,7	85,1 ± 20,1	21,9 ± 1,4	20,4 ± 5,0
9		10	18	14,0 ± 0,3	90,8 ± 6,8	69,9 ± 21,5	20,6 ± 1,6	17,4 ± 5,1
10		12	14	9,2 ± 0,9	121,2 ± 13,2	72,4 ± 18,5	28,2 ± 1,8	28,1 ± 6,4
11	ESMP	12	16	10,7 ± 0,5	105,4 ± 11,1	75,3 ± 11,6	26,7 ± 1,9	21,9 ± 6,0
12		12	18	13,0 ± 0,4	107,2 ± 18,0	74,4 ± 22,3	25,6 ± 2,2	19,7 ± 5,3
13		8	14	8,0 ± 0,2	161,0 ± 19,9	58,9 ± 20,6	27,1 ± 1,6	33,7 ± 7,1
14	SMP	8	16	8,6 ± 0,5	135,2 ± 13,1	73,0 ± 13,5	25,5 ± 1,3	27,4 ± 5,9
15		8	18	11,0 ± 0,2	110,8 ± 11,7	62,1 ± 26,8	21,5 ± 1,4	21,0 ± 5,4
16		10	14	8,2 ± 0,2	182,8 ± 11,3	54,6 ± 15,6	29,8 ± 1,0	31,2 ± 6,0
17		10	16	9,1 ± 0,4	142,2 ± 7,8	58,9 ± 11,3	27,5 ± 1,1	27,3 ± 5,8
18	SMP	10	16	9,5 ± 0,3	151,2 ± 13,0	53,9 ± 14,7	26,9 ± 1,4	25,5 ± 6,1
19		10	16	10,5 ± 0,4	136,0 ± 12,7	59,9 ± 35,4	25,7 ± 1,2	24,3 ± 5,6
20		10	16	9,7 ± 0,1	148,8 ± 8,0	52,1 ± 17,3	26,3 ± 1,1	26,0 ± 6,5
21		10	18	11,3 ± 0,1	120,6 ± 12,3	44,3 ± 17,3	23,8 ± 1,0	20,6 ± 5,1
22		12	14	7,3 ± 0,02	191,2 ± 10,2	52,7 ± 16,8	31,6 ± 1,1	30,4 ± 5,5
23	SMP	12	16	9,0 ± 0,3	152,4 ± 11,4	48,6 ± 11,7	27,3 ± 1,5	22,3 ± 6,0
24		12	18	9,5 ± 0,2	132,6 ± 5,5	49,0 ± 15,7	26,5 ± 0,9	15,1 ± 3,3
25		8	14	8,0 ± 0,2	145,6 ± 5,5	70,9 ± 19,6	26,6 ± 0,9	33,7 ± 6,3
26	ESSMP	8	16	9,2 ± 0,5	118,6 ± 11,9	74,4 ± 14,6	24,0 ± 0,9	27,0 ± 4,4
27		8	18	11,8 ± 0,2	109,2 ± 9,5	77,9 ± 12,6	21,0 ± 0,9	23,4 ± 5,4
28		10	14	8,9 ± 0,2	129,4 ± 11,0	93,7 ± 29,4	26,8 ± 1,1	25,8 ± 5,1
29		10	16	10,5 ± 0,2	119,6 ± 19,1	82,3 ± 25,5	25,9 ± 1,9	19,3 ± 6,1
30	ESSMP	10	16	10,5 ± 0,3	126,4 ± 19,3	89,5 ± 13,9	26,3 ± 1,7	21,2 ± 5,5
31		10	16	10,6 ± 0,2	112,4 ± 12,2	93,0 ± 34,4	25,5 ± 1,4	20,9 ± 4,8
32		10	16	11,6 ± 0,2	105,8 ± 15,7	83,6 ± 15,8	24,7 ± 1,3	18,8 ± 4,0
33		10	18	12,4 ± 0,03	97,2 ± 14,3	77,4 ± 28,9	24,3 ± 0,8	17,0 ± 3,6
34		12	14	10,2 ± 0,6	113,0 ± 7,7	92,2 ± 38,3	27,1 ± 2,3	19,2 ± 4,9
35	ESSMP	12	16	11,4 ± 0,4	111,4 ± 19,5	90,4 ± 22,2	25,7 ± 2,5	15,7 ± 5,4
36		12	18	12,6 ± 0,3	90,0 ± 17,3	94,9 ± 30,6	25,8 ± 2,2	13,4 ± 4,3

Liite 3. PLSR-analyysin korrelaatiotaulukko,

ESMP-maitojauhe							
	X ₁	X ₂	vesipit.	eksp.	kovuus	vääntöm.	paine
X ₁	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X ₂	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
vesipit.	0,49	0,71	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
eksp.	-0,53	-0,42	-0,84	1,00	0,00	0,00	0,00
kovuus	-0,21	0,23	0,03	-0,14	1,00	0,00	0,00
vääntöm.	0,08	-0,55	-0,71	0,67	-0,37	1,00	0,00
paine	-0,59	-0,60	-0,92	0,94	-0,21	0,69	1,00
SMP-maitojauhe							
	X ₁	X ₂	vesipit.	eksp.	kovuus	vääntöm.	paine
X ₁	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X ₂	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
vesipit.	-0,18	0,85	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
eksp.	0,37	-0,90	-0,86	1,00	0,00	0,00	0,00
kovuus	-0,71	-0,18	-0,17	-0,14	1,00	0,00	0,00
vääntöm.	0,54	-0,80	-0,85	0,95	-0,19	1,00	0,00
paine	-0,34	-0,92	-0,70	0,71	0,36	0,57	1,00
ESSMP-maitojauhe							
	X ₁	X ₂	vesipit.	eksp.	kovuus	vääntöm.	paine
X ₁	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X ₂	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
vesipit.	0,45	0,85	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
eksp.	-0,49	-0,76	-0,92	1,00	0,00	0,00	0,00
kovuus	0,80	-0,10	0,26	-0,31	1,00	0,00	0,00
vääntöm.	0,52	-0,69	-0,43	0,37	0,47	1,00	0,00
paine	-0,79	-0,55	-0,87	0,85	-0,58	0,01	1,00

X₁ = maitoproteiinipitoisuusX₂ = massan vesipitoisuus

Liite 4. Split-plot-kokeiden koejärjestys.

	WP		SP			
Koe	KoePv1	KoePv2	PrP	VeP	D1	D2
1	1	1	1	-1	1	0
2	1	1	1	1	1	0
3	1	1	1	0	1	0
4	2	2	-1	0	1	0
5	2	2	-1	-1	1	0
6	2	2	-1	1	1	0
7	3	3	0	0	1	0
7	3	3	0	0	1	0
7	3	3	0	0	1	0
8	3	3	0	1	1	0
7	3	3	0	0	1	0
9	3	3	0	-1	1	0
10	4	1	-1	0	0	0
11	4	1	-1	1	0	0
12	4	1	-1	-1	0	0
13	5	2	1	-1	0	0
14	5	2	1	1	0	0
15	5	2	1	0	0	0
16	6	3	0	0	0	0
17	6	3	0	1	0	0
18	6	3	0	-1	0	0
16	6	3	0	0	0	0
16	6	3	0	0	0	0
16	6	3	0	0	0	0
19	7	1	-1	1	0	1
20	7	1	-1	-1	0	1
21	7	1	-1	0	0	1
22	8	2	1	0	0	1
23	8	2	1	-1	0	1
24	8	2	1	1	0	1
25	9	3	0	0	0	1
25	9	3	0	0	0	1
25	9	3	0	0	0	1
26	9	3	0	-1	0	1
27	9	3	0	1	0	1
25	9	3	0	0	0	1

WP = whole plot, SP = subplot, PrP = maitoproteiinipitoisuus, VeP = massan vesipitoisuus, D1 = 1. dummy-muuttuja, D2 = 2. dummy-muuttuja
 ESMP-maitojauhe D1 = 1 ja D2 0; SMP-maitojauhe D1 = 0 ja D2 = 0; ESSMP-maitojauhe D1 = 0 ja D2 = 1.

Liite 5. Split-plot-kokeiden malli selittävien muuttujien osalta.

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3} + \eta_{k(i)} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha_1\alpha_1)_{ij} + (\beta\beta)_{ij} + \varepsilon_{k(ij)}, \text{ missä}$$

y_{ijk} = vastemuuttujan arvo

μ = vakiotermi

α_{i1} = maitoproteiinipitoisuuden kiinteiden vaikutusten osuus

α_{i2} = 1. dummy-muuttujan kiinteiden vaikutusten osuus

α_{i3} = 2. dummy-muuttujan kiinteiden vaikutusten osuus

$\eta_{k(i)}$ = WP:n virhe

β_j = vesipitoisuuden kiinteiden vaikutusten osuus

$(\alpha_1\beta)_{ij}$ = maitoproteiinipitoisuuden ja vesipitoisuuden yhdysvaikutus

$(\alpha_1\alpha_1)_{ij}$ = maitoproteiinipitoisuuden neliöllinen vaikutus

$(\beta\beta)_{ij}$ = vesipitoisuuden neliöllinen vaikutus

$\varepsilon_{k(ij)}$ = SP:n virhe

Malli annettiin fitlme-funktioon laskettavaksi muodossa: $V \sim D1 + D2 + PrP + VeP + PrP:VeP + PrP:Prp + VeP + VeP:VeP + (1|WP)$, missä V on tutkittava vastemuuttuja ja kaksoispiste vastaa kertolaskua.

Liite 6. Split-plot-kokeissa saatujen vastemuuttujien mitatut arvot ja jäännösarvot, joilla arvioidaan mallin sovitusta.

